

Petri Lindfors

Ääneneristysten testitilojen suunnittelu

Opinnäytetyö

Kevät 2016

SeAMK Tekniikka

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: SeAMK Tekniikka

Tutkinto-ohjelma: Rakennustekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Rakennesuunnittelu

Tekijä: Petri Lindfors

Työn nimi: Ääneneristysten testitilojen suunnittelu

Ohjaaja: Jorma Tuomisto

Vuosi: 2016 Sivumäärä: 63 Liitteiden lukumäärä: 4

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella testaustilat ääneneristysmittauksia varten. Testitilat suunniteltiin ISO 10140 –standardin mukaisesti soveltuvien osien. Tehtävänä oli selvittää rakenteiden ja liittymien riskipaikat sekä suunnitella liittymät ympäröiviin rakenteisiin. Opinnäytetyössä tarkasteltiin äänitekniisiä asioita teorian pohjalta.

Testaustiloja tullaan käyttämään ovien, ikkunoiden ja siirtoseinien ääneneristysten tuotekehitykseen. Teknisten rajoitusten kuten pienen koon ja kevyiden rakenteiden vuoksi se ei sovellu kuitenkaan virallisiin laboratoriomittauksiin.

Opinnäytetyö antaa lukijalle kattavan tietopaketin ääneneristävyys toteutuksesta ja rakenteiden ääniteknisestä toiminnasta.

Avainsanat: Ääneneristys, ääni, taajuus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Construction Engineering

Specialisation: Building Construction

Author/s: Petri Lindfors

Title of thesis: Designing an Acoustics Laboratory

Supervisor: Jorma Tuomisto

Year: 2016

Number of pages: 63

Number of appendices: 4

The goal of the thesis was to design an acoustics laboratory for soundproofing measurements. The acoustics laboratory was designed according to the ISO 10140 –standard when applicable. The goal was to define risk factors in structures and joints and also to design joints in joining structures. Sound technical structures were examined based on theory.

The acoustics laboratory is going to be used in product development of sound technical structures such as doors, windows and partition walls. Because of technical limitations such as small dimensions and lightweight structures, the acoustics laboratory is not suitable for official laboratory measurements.

The thesis gives its reader a comprehensive information package about the execution of soundproofing and sound behaviour in structures.

Keywords: Soundproofing, sound, frequency

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	1
Thesis abstract.....	2
SISÄLTÖ	3
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo	5
Käytetyt termit ja lyhenteet	7
1 JOHDANTO	8
2 YLEISTÄ TIETOA ÄÄNESTÄ JA ÄÄNENERISTYKSESTÄ.....	9
2.1 Ääni.....	9
2.2 Äänenvoimakkuus.....	10
2.3 Ääniteho ja äänitehotaso.....	10
2.4 Äänentaajuus	11
3 RAKENTEIDEN ÄÄNITEKNIIKAN TEORIAA	12
3.1 Ääneneristuksen ja absorption erottaminen	12
3.2 Jälkikaiunta-aika.....	15
3.3 Massalaki	16
3.4 Koinsidenssi-ilmiö	16
3.5 Resonanssi-ilmiö.....	19
3.6 Sivutiesiirtymä	20
3.7 Yksinkertainen rakenne.....	25
3.8 Kaksinkertainen rakenne.....	26
3.9 Rakenteiden saumojen ääneneristävyys.....	27
4 ÄÄNENERISTYKSEN TESTITILOJEN SUUNNITTELU.....	30
4.1 Lähtökohtia suunnittelulle.....	30
4.2 Laboratoriomittaus	32
4.3 Seinärakenteet.....	36
4.4 Lattiarakenteet	42
4.5 Kattorakenteet.....	44
4.6 Testausväliseinä	44
4.7 Rakenteiden liittymät.....	46
4.8 Testaustilojen käyntiovet.....	46

5 POHDINTA	48
LÄHTEET	49
OPINNÄYTETYÖHÖN LIITTYVIÄ STANDARDEJA	50
Liite 1: Massiivisen kivrakenteisen väliseinän ääneneristävyyslaskelmat	51
Liite 2: Kaksinkertaisen levyseinän ääneneristävyyslaskelmat	52
Liite 3: Testaustilojen ääneneristävyysmittaukset	54
Liite 4: Kuvia testaustilojen rakennusvaiheista.....	55

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Oktaavikaistat (Kylliäinen 2013, 6.)	11
Kuvio 2. Absorptiosuhde (Kylliäinen 2013, 18.)	12
Kuvio 3. Koinsidenssi-ilmiö (Lahtela 2004, 21.)	17
Kuvio 4. Sivutiesiirtymäreittejä rakennuksessa (Kylliäinen 2013, 12.)	21
Kuvio 5. Sivutiesiirtymien merkintä standardin EN 12354-1 mukaan (RIL 243-1-2007 2007, 110.)	22
Kuvio 6. Yksinkertaisen seinän rajataajuudet (Kylliäinen 2013, 8.)	25
Kuvio 7. Kaksinkertaisen levyseinän kytkennät (RIL 243-1-2007 2007, 74.)	27
Kuvio 8. Testaustilojen mittasuhteet (ISO 10140-5, 2010,5.)	30
Kuvio 9. Äänen kulkeutuminen testitiloissa (ISO 10140-5, 2010,10.)	30
Kuvio 10. Testitilojen pohjakuva	32
Kuvio 11. Testauspöytäkirja (ISO 10140-1 2010,10.)	34
Kuvio 12. Sivuseinän rakenne	38
Kuvio 13. Päätyseinän rakenne	39
Kuvio 14. Kytkentöjen vaikutus. (Hongisto 2015, 51.)	40
Kuvio 15. Kaksinkertaisen seinän ääneneristävyyden kehittyminen	41
Kuvio 16. Kaksinkertaisen teräsrankaseinän ilmaääneneristävyys (Hongisto 2015, 32.)	41
Kuvio 17. Päätyseinän rakenne	42
Kuvio 18. Lattiarakenne	42

Kuvio 19. Kattorakenne.....	44
Kuvio 20. Testausväliseinän leikkauskuva.....	45
Kuvio 21. Testausväliseinän ääneneristävyiden kehittyminen	46
Taulukko 1. Absorptiosuhde (RIL 243-1-2007 2007, 47.)	13
Taulukko 2. Ilmaääneneristys käytännössä (RIL 243-1-2007 2007, 69.)	14
Taulukko 3. Tehosuhteiden vaikutus ääneneristävyteen (RIL 243-1-2007 2007, 48.).....	15
Taulukko 4. Rakennuslevyjen pintamassoja m' , koinsidenssin rajataajuuksia f_c , kimmomoduuleja E ja ääneneristyslukuja R_w (RIL 243-1-2007 2007, 91.).....	19
Taulukko 5. Kipsilevyn resonanssitaajuuden riippuvuus koolausvälistä (Siikanen 1996, 116.).....	20
Taulukko 6. Raon vaikutus rakenteen ilmaääneneristävyteen (Lahtela 2004, 20.)	29
Taulukko 7. Tyypillisiä ääneneristävyksiä testaustiloissa (ISO 10140-5, 2010, 12.)	31

Käytetyt termit ja lyhenteet

Ääneneristys	Äänen siirtymisen estäminen, joka ei pääasiallisesti perustu äänen absorptioon.
Äänenvaimennus	Yleisnimitys äänitason alenemiselle tai toimenpiteelle äänitason alentamiseksi.
Värähtely	Aineessa tai kappaleessa esiintyvä jaksottainen liike.
Massalaki	Laki, jonka mukaan rakenteen massan (kg/m^2) lisääntyessä ääneneristävyys paranee.
Ilmajousi	Ilmajousella tarkoitetaan kaksinkertaisen rakenteen ilmatilaa, jonka välityksellä äänen värähtelyliike siirtyy rakenteen toisella puolelle.
Koinsidenssi	Koinsidenssiksi kutsutaan tilannetta, jossa teoreettisesti ääretön levymäinen rakenne alkaa myötävärähdellä (taivutusvärähtelyä) siihen kohdistuvan äänen ansiosta siten, että ääni läpäisee levyrakenteen vaimentuen lähinnä vain materiaalin sisäisten häviöiden vuoksi.
Resonanssi	Resonanssiksi kutsutaan tilannetta, jossa ääniaallon osuessa rakenteeseen rakenne alkaa värähdellä kun resonanssitaajuusalue on saavutettu.
Ilmaääni	Ilman välityksellä leviävä ääni.
Runkoääni	Rakenteessa etenevä mekaaninen värähtely, joka aiheuttaa ilmaääntä.
Sivutiesiirtymä	Äänen kulkeutumista muita reittejä kuin tarkasteltavan rakenteen läpi sanotaan sivutiesiirtymäksi.

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on ääneneristystestaustilojen suunnittelu. Rakennusteollisuudessa on ollut jo kauan kysyntää ääneneristystestauksista. Kun uuteen rakennuslaboratorioon ei mahtunut testaustiloja, tuli tarve rakentaa testaustilat erillisiin tiloihin. Testitilojen rakentamista lähti sponsoroimaan kaksi paikallista rakennusalan yritystä, Skaala Oy ja Kurikan Interiööri Oy sekä runkomelueristysratkaisuja tuottava yritys, Christian Berner Oy.

Työn tavoitteena on suunnitella mahdollisimman hyvin ääntä eristävä rakenne, joka soveltuu ääneneristystestauksiin.

Opinnäytetyössä käydään läpi äänen teoriaa ja käsitteitä ääneneristävydestä.

2 YLEISTÄ TIETOA ÄÄNESTÄ JA ÄÄNENERISTYKSESTÄ

2.1 Ääni

Äänellä tarkoitetaan väliaineessa tapahtuvaa aaltoliikettä. Väliaineita voivat olla kaasu, neste tai kiinteä aine. Ääni tarvitsee aina edetäkseen väliaineen, sillä tyhjiössä ääni ei voi edetä. Ääniaallot ovat kimmoisia eli elastisia, joissa värähdysliike etenee joko pitkittäis- eli tihennysaaltoina tai poikittais- eli taivutusaaltoina. Poikittaisaaltoja tavataan vain kiinteissä aineissa. Pitkittäisaallot voivat edetä kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä aineissa. (Siikanen 1996, 115.) Ääniaallon edetessä ilmaa pitkin sitä kutsutaan ilmaääneksi. Runkoääneksi kutsutaan ääniaalltoa, joka etenee rakennuksen rungossa. Poikkeavuuksistaan huolimatta ilma- ja runkoääni ovat yhteydessä toisiinsa. Rakenteesta riippuen ilmaääni voi aiheuttaa runkoääntä ja vastaavasti runkoääni aiheuttaa lähes aina ilmaääntä. (Lahtela 2004, 10.) Äänen aallonpituus riippuu äänen nopeudesta väliaineessa ja sen taajuudesta. Aallonpituus voidaan laskea kaavasta 1.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

missä λ on aallonpituus

v on äänen nopeus väliaineessa

f on äänen taajuus

(Siikanen 1996, 117.)

Äänen nopeus ilmassa on riippumaton taajuudesta, mutta ilman lämpötila vaikuttaa äänen nopeuteen (Kaava 2)

$$c = 331 + 0,6t \quad (2)$$

missä c on äänen nopeus [m/s]

t on lämpötila [°C]

(RIL 243-1-2007 2007, 35.)

2.2 Äänenvoimakkuus

Äänenvoimakkuutta kuvataan käsitteellä äänenpainetaso, joka voidaan mitata äänenpainetasomittarilla. Äänenpainetaso ilmoitetaan lukuarvona, jonka yksikkö on desibeli [dB]. Yksittäisiä äänilähteitä ei voi laskea suoraan yhteen siksi, että desibeli on logaritminen suure. (Lahtela 2004, 12.) Yksittäisten äänilähteiden yhdessä aiheuttama kokonaisäänepainetaso voidaan laskea kaavasta 3.

$$L_{kok} = 10 \lg (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10}) \quad (3)$$

missä L_{kok} on kokonaisäänepainetaso [dB]

L_n yksittäisen äänilähteen äänenpainetaso [dB]

(Lahtela 2004, 12.)

2.3 Ääniteho ja äänitehotaso

RIL 243-1-2007 (2007, 47.) mukaan ääniteholtaan vakiona pysyvä äänilähde voi tuottaa hyvin erilaisia äänenpaineita riippuen mittausetäisyydestä, äänilähteen suuntauksesta, huoneen absorptiopinta-alasta ja muista esteistä. Äänilähteen tuottamaa kokonaisäänienergiaa sekuntia kohti kutsutaan äänitehoksi W [W]. Ääniteho on riippumaton mittausetäisyydestä tai huoneen kaiunnasta toisin kuin äänenpaine. Ääniteho ilmoitetaan yleensä äänitehotasona samalla lailla kuin äänenpaine ilmoitetaan äänenpainetasona. Ääniteho muutetaan äänitehotasoksi L_w kaavalla 4.

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad (4)$$

missä W on ääniteho [W]

W_0 on vertailuteho, $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$

(RIL 243-1-2007 2007, 42.)

2.4 Äänentaajuus

Ääniaallon värähtelyiden määrää sekunnissa kutsutaan äänentaajuudeksi. Äänentaajuuden yksikkö on hertsi [Hz]. Mitä suurempi äänentaajuus on, sitä korkeampana ääni kuullaan. Taajuus f voidaan laskea kaavasta 5.

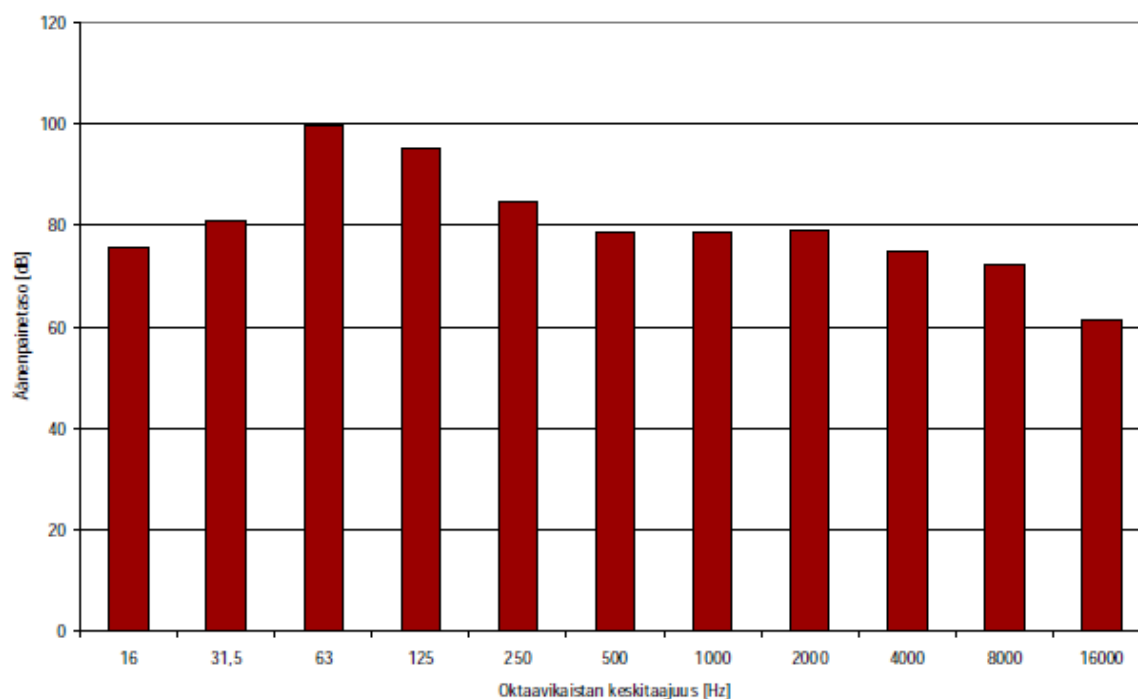
$$f = \frac{n}{T} \quad (5)$$

missä n on värähtelyiden määrä

T on aikajakso, jonka kuluessa värähtelyt on havaittu [s]

(RIL 243-1-2007 2007, 35.)

Normaalkuuloinen ihminen kuulee äänet 16 Hz – 16 000 Hz taajuusalueelta. Ihmisen kuuloalue on herkimmillään 100 Hz – 3150 Hz. Tästä syystä rakenteiden ääneneristyksessä pyritään hyviin ääneneristyslukemiin tällä taajuusalueella. Oktaavi on äänialue, jonka ylimmän ja alimman taajuuden suhde on 2.

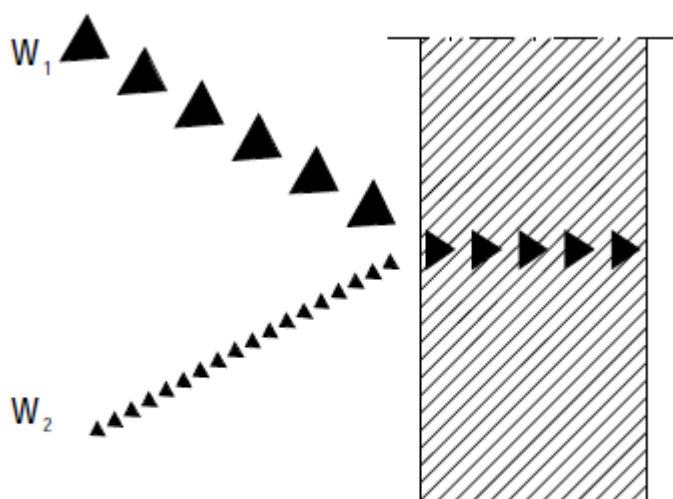


Kuvio 1. Oktaavikaistat (Kylliäinen 2013, 6.)

3 RAKENTEIDEN ÄÄNITEKNIIKAN TEORIAA

3.1 Ääneneristysten ja absorptioiden erottaminen

Äänen absorptio vaimentaa ääntä. Absorptio on pintamateriaalien ominaisuus, kun taas ääneneristys estää äänen kuulumista huonetilasta toiseen. Eristys on tiiviiden rakenteiden ominaisuus. Kuviossa 2 ääniteho kohtaa rakenteen. Osa äänitehosta heijastuu rakenteesta ja osa siirtyy rakenteen välityksellä sen toiselle puolelle. Äänen absorptio on yksikötön suure ja se voidaan määritellä kaavasta 6.



Absorptiosuhde riippuu taajuudesta
Mitataan yleensä oktaavikaistoittain 63-4000 Hz

Kuvio 2. Absorptiosuhde (Kylliäinen 2013, 18.)

$$\alpha = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \quad (6)$$

missä W_1 on rakenteeseen kohdistunut ääniteho [W]

W_2 on rakenteesta takaisin heijastunut ääniteho [W]

(Kylliäinen 2013, 18.)

Äänen absorptio α :lle voidaan saada arvoja 0 – 1. Absorptiosuhteen kasvaessa vähemmän ääntä pääsee heijastumaan takaisin huonetilaan. Absorption vaikutus äänitehoon voidaan laskea kaavasta 7.

$$\Delta L = 10 \log \frac{1}{1-\alpha} \quad (7)$$

missä ΔL on äänitehotason alenema [dB]

α on absorptiosuhde [yksikötön]

(Kylliäinen 2013, 20.)

Taulukko 1:ssa on esitelty äänen absorption käytännön merkitystä.

Taulukko 1. Absorptiosuhde (RIL 243-1-2007 2007, 47.)

Absorptiosuhde α	Pintaanosuvan ja pinnasta heijastuneen äänien intensiteettitasen erotus [dB]
0	0,0
0,1	0,5
0,2	1,0
0,3	1,5
0,4	2,2
0,5	3,0
0,6	4,0
0,7	5,2
0,8	7,0
0,9	10,0
0,99	20,0
0,999	30,0
jne	jne

Absorptioala kertoo huoneessa olevan absorptiomateriaalin kokonaismäärän neliömetreinä. Se on riippuvainen materiaalien absorptiosuhteista α sekä materiaalien pinta-aloista S huoneessa. Kaavasta 8 voidaan laskea tilan absorptioala kullakin oktaavikaistan keskitaajuudella.

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \quad (8)$$

missä α_n on materiaalien absorptiosuhde

S_n on materiaalien pinta-ala

(RIL 243-1-2007 2007, 49.)

Absorptioalaa merkitään [$\text{m}^2\text{-Sab}$], jotta sitä ei sekoitettaisi tavalliseen pinta-alaan. Esimerkiksi jos materiaalin absorptiosuhde on 0,9 ja sen pinta-ala on 10m^2 , absorptioalaksi saadaan $9\text{m}^2\text{-Sab}$. Absorptioalan kaksinkertaistuessa huonevaimennus kasvaa 3 dB eli äänenpainetaso huoneessa laskee 3 dB. (RIL 243-1-2007 2007, 51.)

Ilmaääneneristävyys R voidaan määritellä tehosuhteiden kymmenkantaisena logaritmina. (Kaava 9.)

$$R = 10 \log_{10} \frac{W_1}{W_2} \quad (9)$$

missä W_1 on rakenteeseen kohdistunut ääniteho [W]

W_2 on rakenteen läpäissyt ääniteho [W]

(Kylliäinen 2013, 8.)

Taulukko 2. Ilmaääneneristys käytännössä (RIL 243-1-2007 2007, 69.)

Ilmaääneneristysluku R'_w [dB]	Kokemus puheäänistä viereisessä tilassa
> 60	Voimakas huuto kuuluu seinän läpi, sanoista ei saa selvää
> 55	Voimakas puhe ei kuulu seinän läpi
> 50	Voimakas puhe kuuluu seinän läpi, sanoista ei saa selvää
> 45	Normaali keskusteluääni ei kuulu seinän läpi
> 40	Normaali keskusteluääni kuuluu seinän läpi, sanoista ei saa selvää
> 35	Normaali keskusteluääni kuuluu seinän läpi, sanoista saa selvää
> 30	Seinä ei estä kuuntelemasta tapahtumia viereisestä tilasta

Taulukosta 3 nähdään tehosuhteiden vaikutus ääneneristävyyteen.

Vertailemalla Taulukkoja 1 ja 3 huomataan, että äänen absorption vaikutus äänitehon vaimennukseen on yleensä alle 10 dB absorptiosuhteen ollessa $\alpha < 0,90$, kun taas ääneneristävyyden vaikutus on vähintään 10 dB. Tästä syystä ääneneristys on tehokkain tapa estää äänen siirtymistä tilasta toiseen.

Taulukko 3. Tehosuhteiden vaikutus ääneneristävyyteen (RIL 243-1-2007 2007, 48.)

W_1 / W_2	R [dB]
1	0
0,1	10
0,01	20
0,001	30
0,0001	40
0,00001	50
0,000001	60
jne	jne

3.2 Jälkikaiunta-aika

Jälkikaiunta-ajalla T [s] kuvataan, kuinka nopeasti äänilähteen tilaan synnyttämä äänenpainetaso laskee äänilähteen sammuttua. Jälkikaiunta-ajan kuluessa äänenpainetaso tilassa on laskenut 60 dB. Lyhyet ja pitkät jälkikaiunta-ajat aiheuttavat ongelmia puheen selkeydessä. Lyhyt jälkikaiunta-aika saa tavut vaimenemaan nopeasti ja pitkällä jälkikaiunta-ajalla tavut jäävät soimaan toistensa päälle. Jälkikaiunta-aika pystytään laskemaan kaavasta 10 kuutiomaiselle ja kovapintaiselle tilalle. Tilan mittojen täytyy olla huomattavasti suuremmat kuin tarkasteltavan äänen aallonpituus.

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad (10)$$

missä V on huoneen tilavuus [m^3]

A on absorptioala [m^2 -Sab]

(RIL 243-1-2007 2007, 48.)

RIL 243-1-2007 (2007,50.) mukaan jälkikaiunta-ajan kaavaa ei voida soveltaa riittävän tarkasti suurimmassa osassa huonetiloja. Kaava ei sovellu suurten ja voimakkaasti absorboivien tilojen absorptioalan arviointiin eikä myöskään tiloihin, joissa absorptioala on keskitetty yhteen pintaan ja muut pinnat ovat lähes täysin heijastavia.

3.3 Massalaki

Massalain mukaan rakennusosan ilmaääneneristävyys on riippuvainen rakenteen pintamassasta m' [kg/m^2] ja taajuudesta. Ilmaääneneristävyys voidaan laskea massalain mukaan kaavasta 11.

$$R_o = 20 \lg m' + 20 \lg f - 47 \quad (11)$$

missä m' on rakenteen pintamassa [kg/m^2]

f on taajuus [Hz]

(Kylliäinen 2013, 9.)

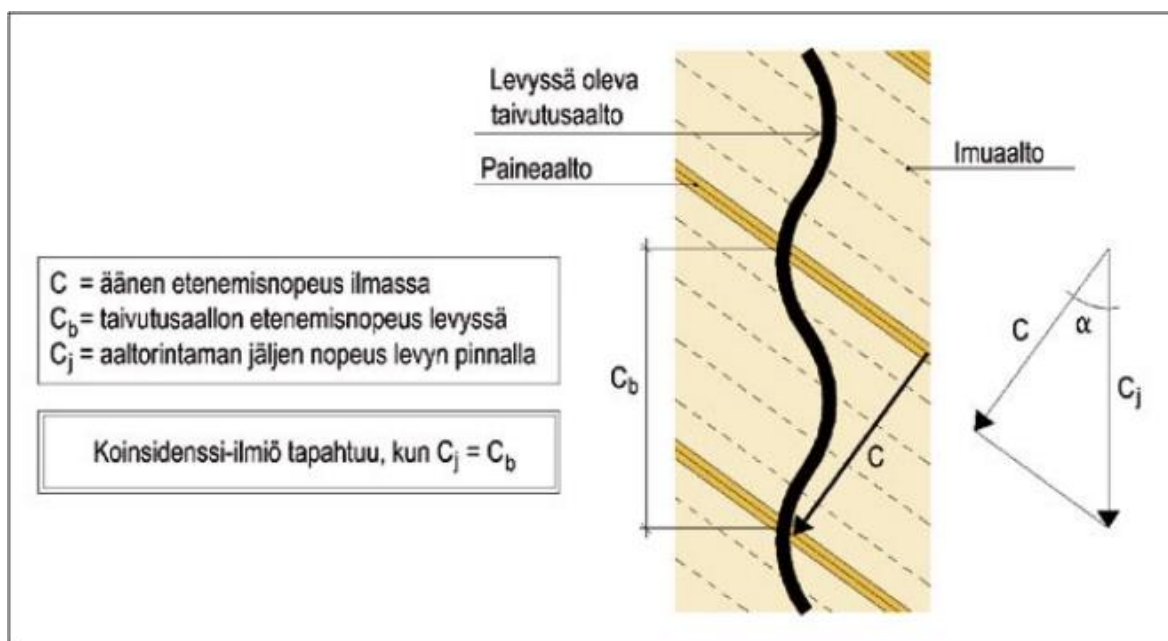
Kun rakenne on hyvin raskas, sen ääneneristävyyttä ei kuitenkaan saada pienellä massan lisäyksellä oleellisesti parannettua. Näin ollen rakenteen ääneneristävyyden kannalta massan lisääminen onkin taloudellisesti järkevää vain silloin, kun rakenne on alunperin kevyt. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että rakenteen massan kaksinkertaistaminen parantaa rakenteen ilmaääneneristävyyttä 4 – 6 dB (Lahtela 2004, 18.)

3.4 Koinsidenssi-ilmiö

Kun äänen etenemisnopeus ilmassa eri taajuuksilla on vakio ja taivutusaallon nopeus materiaalissa määräytyy taajuudesta on olemassa taajuus, jolla nopeudet ovat samoja. Tätä taajuutta kutsutaan koinsidenssitaajuudeksi f_c [Hz].

Koinsidenssitaajuus heikentää huomattavasti ääneneristävyyttä taajuuden ollessa koinsidenssitaajuuden yläpuolella. Eri materiaaleilla koinsidenssikohta on eri taajuudella. Mitä painavampi, paksumpi tai jäykempi rakenne on sitä pienemmällä taajuudella koinsidenssikohta esiintyy. (Ympäristöministeriö 2003, 19.)

Koinsidenssi-ilmiö syntyy kun levyn pintaan tietyssä kulmassa osuvan ääniaaltorintaman jälki ja levyssä oleva äänen aiheuttama taivutusaalto etenevät samalla nopeudella. Tällöin jatkuva ääni aiheuttaa yli- ja alipainerintaman, joka osuu levyssä olevaan taivutusaallon laaksoon ja huippuun. (Kuvio 3.)



Kuvio 3. Koinsidenssi-ilmiö (Lahtela 2004, 21.)

Ohuen rakennuslevyn (0,4 mm – 25 mm) ilmaääneneristävyys R [dB] voidaan laskea eri taajuuksilla melko tarkasti kaavalla 12. Kaavan 12 ensimmäisen rivin yhtälöä kutsutaan massalainksi. Se määrää ääneneristävyyden pienillä ja keskisuurilla taajuuksilla. Massalain mukaan ilmaääneneristävyys kasvaa 6 dB joko massan tai taajuuden kaksinkertaistuessa. (RIL 243-1-2007 2007, 71.)

$$R = \begin{cases} 20 \log_{10} m' f - 48 \text{ dB}, & \text{kun } f < \frac{1}{2} f_c \\ 20 \log_{10} m' f + 10 \log_{10} \left[\eta \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) \right] - 44 \text{ dB}, & \text{kun } f \geq f_c \end{cases} \quad (12)$$

missä m' on rakenteen pintamassa [kg/m^2]

η on häviökerroin [yksikötön]

Koinsidenssin rajataajuus f_c lasketaan kaavasta 13

(RIL 243-1-2007 2007, 71.)

Reunoiltaan ruuvatulle rakennuslevylle voidaan käyttää häviökertoimen vakioarvoa $\eta = 0,02$ koinsidenssitaajuuden yläpuolella. Häviökerroin vaikuttaa huomattavasti enemmän massiivisten kiviseinien ääneneristävyyteen, koska koinsidenssin rajataajuus on useimmiten alle 500 Hz. (RIL 243-1-2007 2007, 71.)

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)m'}{Eh^3}} \quad (13)$$

Missä E on materiaalin kimmomoduuli [Pa]

h on levyn paksuus [m]

μ on Poissonin luku [yksikötön]

m' on rakenteen pintamassa [kg/m^2]

c_0 on äänen nopeus ilmassa [m/s]

(RIL 243-1-2007 2007, 71.)

Poissonin suhteen arvona voidaan käyttää $\mu = 0,25$ rakennuslevyille, betonille ja lasille. Metalleille $\mu = 0,30$ ja $\mu = 0,40$ kumille ja bitumille. (RIL 243-1-2007 2007, 71.)

Pintamassan kasvaessa tai taivutusjäykkyyden pienetessä ohuen levyn ääneneristävyys paranee. Mitä jäykempi levy on, sitä alempana koinsidenssin rajataajuus on. Hyvä ilmaääneneristys saadaan käyttämällä levyjä, joilla koinsidenssin rajataajuus on vähintään 2500 Hz. Tällöin koinsidenssikuoppa sijaitsee ilmaääneneristysluvun R_w määrittämisen kannalta epäoleellisella taajuusalueella eikä heikennä R_w -arvoa. (RIL 243-1-2007 2007, 73.) Taulukossa 4 on esitelty rakennuslevyjen ominaisuuksia ja niiden ääneneristävyyslukuja.

Taulukko 4. Rakennuslevyjen pintamassoja m' , koinsidenssin rajataajuuksia f_c , kimmomoduuleja E ja ääneneristyslukuja R_w (RIL 243-1-2007 2007, 91.)

	m' [kg/m ²]	f_c [Hz]	E [Gpa]	R_w [dB]
Kipsikartonki (Knauf)				
Saneeraus 6 mm	5,9	5300	5,4	28
Tuulensuoja 9 mm	7,6	3150	4,8	28
Normaali 13 mm	8,8	2500	3,0	28
Erikoiskova 13 mm	11,7	2500	4,5	29
Lattia 15 mm	16,8	2000	7,8	31
Puupohjaiset				
Lastulevy 11 mm	7,0	4000	2,9	29
MDF 12 mm	9,2	2500	6,3	28
Vaneri 15 mm	10,4	1600	11,0	26
MDF 19 mm	13,8	1600	4,8	28
Lastulevy 22 mm	13,9	2000	3,4	29
Vaneri 21 mm	15,0	1250	11,0	28
Puukuitu				
Tuulensuojalevy 12 mm	3,1	8000	0,3	23
Tuulensuojalevy 25 mm	8,0	4000	0,2	30
Teräs				
2 mm	15,6	8000	213,0	36
4 mm	31,2	3150	213,0	40

3.5 Resonanssi-ilmiö

Kun rakenteeseen osuu ääniaaltoja, joiden taajuus on rakenteen resonanssitaajuudella eli ominaistajuusalueella, rakenne alkaa värähdellä ja säteilemään ääntä voimakkaasti, jolloin sen ääneneristävyys heikkenee. Rakenteen voimakas värähtely johtuu siitä, että rakenteessa oleva värähtelysystemi saa koko ajan lisää energiaa siihen kohdistuvista ääniaalloista. (Lahtela 2004, 20.)

Yksinkertainen seinä toimii jousen tavoin. Ominaistaajuus, jolla seinä heilahtelee, määräytyy jännemitan, kiinnitystavan, paksuuden, tiheyden ja kimmomoduulin mukaan. Esimerkkinä 13 mm kipsikartonkilevyn resonanssitaajuuden riippuvuus koolausvälistä. (Taulukko 4.) Koolausvälin tulisi olla vähintään 600 mm, jotta resonanssitaajuus jäisi tavallisimman äänialueen ulkopuolelle.

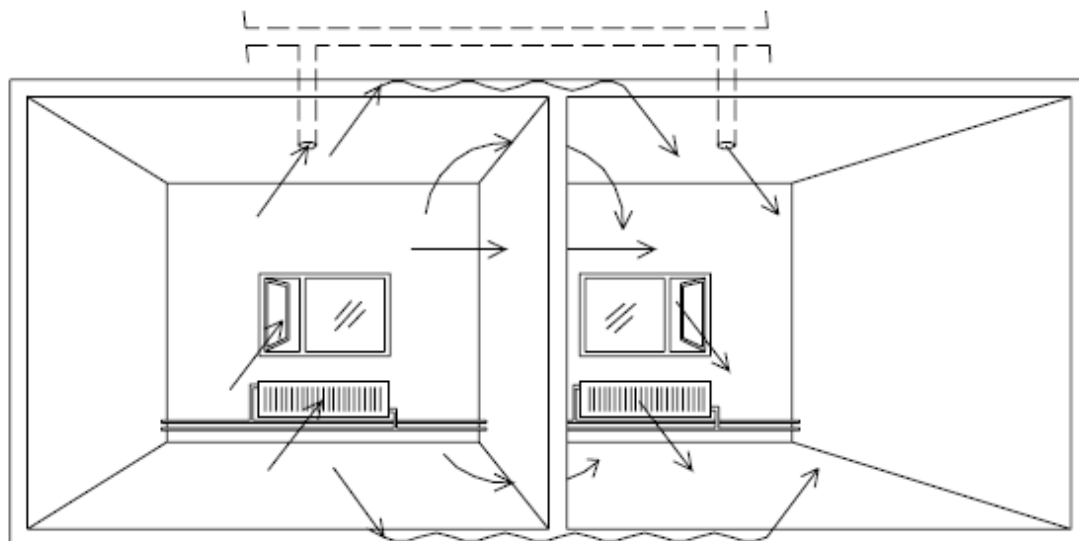
Taulukko 5. Kipsilevyn resonanssitaajuuden riippuvuus koolausvälistä (Siikanen 1996, 116.)

Koolausväli	Ominaistaajuus f_0
400 mm	130 Hz
600 mm	60 Hz
900 mm	25 Hz
1200 mm	15 Hz

3.6 Sivutiesiirtymä

RIL 243-1-2007 mukaan (2007, 106.) sivutiesiirtymä on äänen siirtymistä, joka tapahtuu tilojen välillä muuta reittiä kuin suoraan tiloja erottavan rakenteen läpi. Sivutiesiirtymää tapahtuu myös LVIS –järjestelmien kautta. Sivutiesiirtymästä johtuen rakennuksen tilojen välillä mitattava ilmaääneneristysluku R'_w on aina alhaisempi kuin vastaava rakennusosan laboratoriossa mitattu ilmaääneneristysluku R_w .

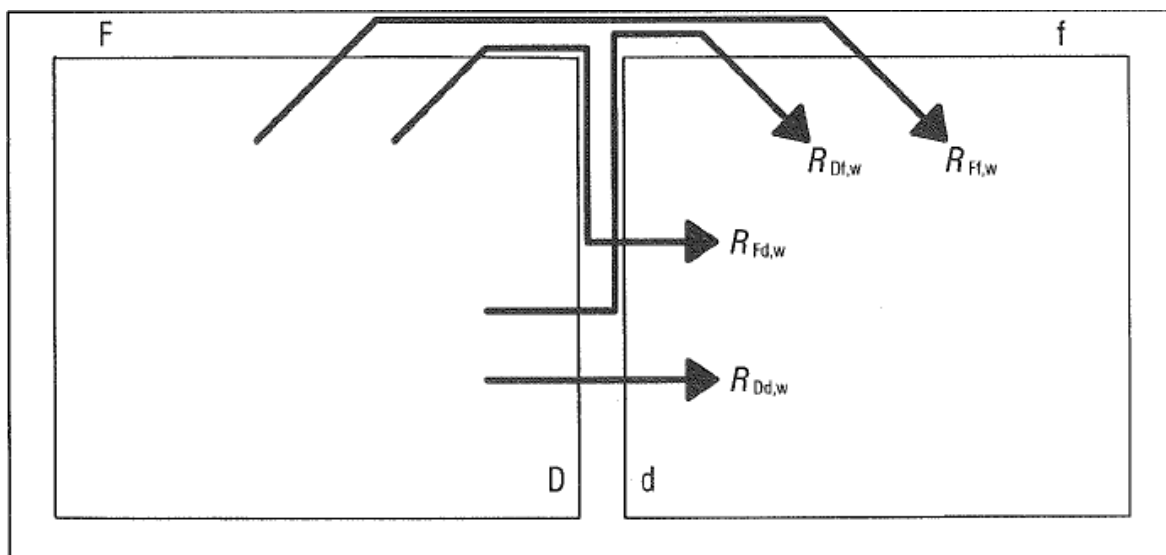
Rakenteellisella sivutiesiirtymällä tarkoitetaan äänen kulkeutumisreittejä, joissa ääni kulkeutuu yhden tai useamman huonetta sivuavan rakenteen kautta. Rakennuksessa on aina rakenteellista sivutiesiirtymää, koska tilassa toimiva äänilähde saa kaikki tilan pinnat värähtelemään. Runkoäänen energian jakautuminen liitoksissa on riippuvainen rakennusosien massasta ja liitosten jäykkyyksistä. Massan ja jäykkyyden lisäksi rakenteellista sivutiesiirtymää voidaan estää rakenteiden katkaisulla. Rakenne voidaan katkaista ilma-, mineraalivilla- tai kumikerroksella.



Kuvio 4. Sivutiesiirtymäreittejä rakennuksessa (Kylliäinen 2013, 12.)

Standardi EN 12354-1:2000 mukaan voidaan arvioida rakenteellista sivutiesiirtymän osuutta ääneneristykseen. (RIL 243-1-2007 2007, 110.) Kuviosta 5 nähdään sivusiirtymien merkintätapa. Lähetyspuolelta katsottuna väliseinärakenteen merkintä on D. Sivuavia rakenteita F on 4 kappaletta. Vastaanottohuoneen puolelta väliseinärakennetta merkitään d:llä ja sivuavia rakenteita f on myös 4 kpl. Suoria äänireittejä on 1 kpl Dd. Puhtaasti sivuavia rakenteita pitkin eteneviä äänireittejä Ff on 4 kpl, väliseinästä sivuavaan rakenteeseen kulkeutuvia äänireittejä Df on 4 kpl ja sivuavasta rakenteesta väliseinään eteneviä Fd on 4 kpl.

Ff, Df ja Fd:tä kutsutaan ensimmäisen kertaluvun reiteiksi. Yleensä tarkastellaan vain ensimmäisen kertaluvun reittejä, koska toisen ja sitä suurempien kertalukujen ottaminen huomioon vaikuttaa vain noin 1 dB äänienergian määrän arvioinnissa. (RIL 243-1-2007 2007, 111.) Lyhenteet F ja D tulevat englannin kielen sanoista flanking transmission ja direct transmission eli sivutiesiirtymä ja suora äänireitti.



Kuvio 5. Sivutiesiirtymien merkintä standardin EN 12354-1 mukaan (RIL 243-1-2007 2007, 110.)

RIL 243-1-2007 mukaan (2007, 111.) ennustemallia voidaan käyttää, kun tarkastellaan massiivisia rakenteita. Mikäli huoneita erottaa massiivinen seinärakenne, on suoran reitin D_d ilmaääneneristysluku sama kuin massiivisen seinän ilmaääneneristysluku. (Kaava 14.)

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} \quad (14)$$

missä $R_{s,w}$ on massiivisen seinän ilmaääneneristysluku [dB] (RIL 243-1-2007 2007, 111.)

Jos massiivisen seinän päälle on sijoitettu kevytrakenteinen levykerros, huoneita erottavan väliseinän ääneneristävyys saadaan kaavasta 15.

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad (15)$$

missä $\Delta R_{Dd,w}$ on massiivisen seinän päälle joko lähetys- tai vastaanottohuoneen puolelle rakennetun lisäkerroksen tuottama parannus ilmaääneneristyslukuun [dB] (RIL 243-1-2007 2007, 111.)

Sivutiesiirtymäreitin ilmaääneneristysluku kolmelle sivusiirtymätyypille saadaan kaavasta 16, 17 ja 18.

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \log_{10} \frac{S_s}{l_f} \quad (16)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \log_{10} \frac{S_s}{l_f} \quad (17)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \log_{10} \frac{S_s}{l_f} \quad (18)$$

missä $R_{Ff,w}$ on lähetyshuoneessa rakenteen F ilmaääneneristysluku [dB]

$R_{f,w}$ on vastaanottohuoneessa rakenteen f ilmaääneneristysluku [dB]

$\Delta R_{Ff,w}$ on lähetys- ja/tai vastaanottohuoneen sivuavan rakenteen pinnalle rakennetun lisäkerroksen tuottama parannus ilmaääneneristyslukuun [dB]

$\Delta R_{Fd,w}$ on lähetyshuoneen sivuavan rakenteen ja/tai erottavan seinän vastaanottohuoneen puolelle rakennetun lisäkerroksen tuottama parannus ilmaääneneristyslukuun [dB]

$\Delta R_{Df,w}$ on erottavan seinän lähetyshuoneen puolelle ja/tai vastaanottohuoneen sivuavan rakenteen pinnalle rakennetun lisäkerroksen tuottama parannus ilmaääneneristyslukuun. [dB]

K_{Ff} on liitoksen värähtelyeristävyys reitille Ff [dB]

K_{Fd} on liitoksen värähtelyeristävyys reitille Fd [dB]

K_{Df} on liitoksen värähtelyeristävyys reitille Df [dB]

S_s on erottavan väliseinän pinta-ala [m²]

l_f on erottavan väliseinän ja liittyvän rakenteen yhteinen liitospituus [m]

(RIL 243-1-2007 2007, 111,112.)

Lopputuloksena kaavoista 16, 17 ja 18 saadaan kenttämittausta vastaava ilmaääneneristysluku R'_w kaavasta 19.

$$R'_w = -10 \log_{10} \left[10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^4 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum_{F=1}^4 10^{-R_{Fd,w}/10} + \sum_{f=1}^4 10^{-R_{Df,w}/10} \right] \quad (19)$$

(RIL 243-1-2007 2007, 112.)

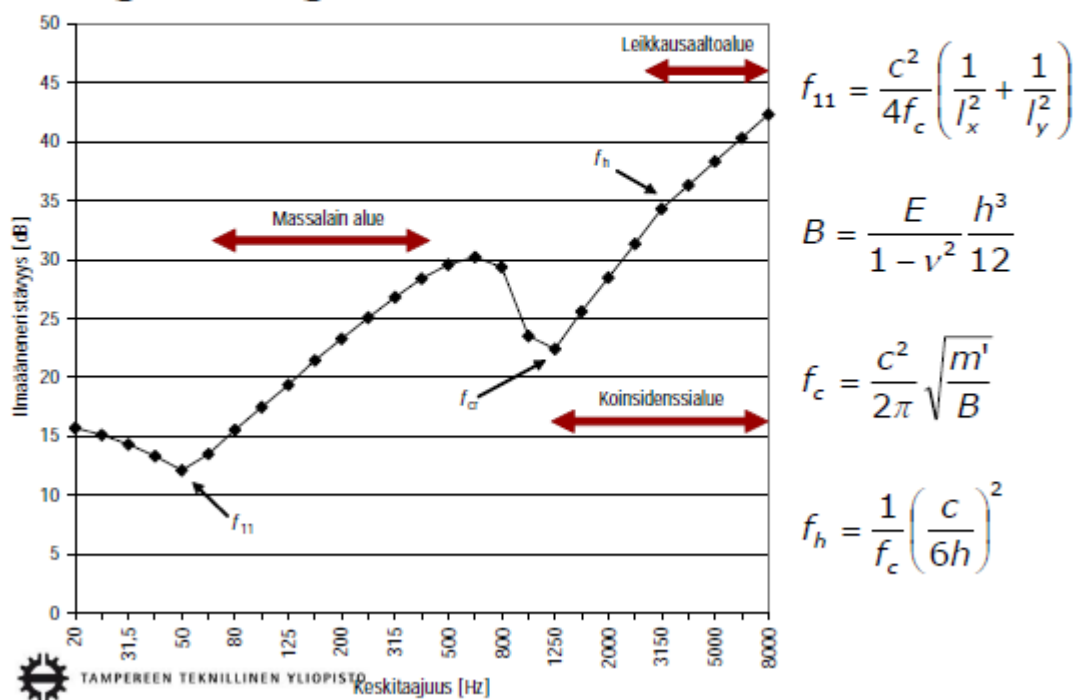
RIL 243-1-2007 mukaan (2007, 112.) termit D_f ja F_d voidaan jättää pois laskennasta jos väliseinä on kevytrakenteinen. Laskentaa ei voi suorittaa luotettavasti jos sivuavat rakenteet ovat kevytrakenteisia.

Rakenteiden pintamassojen [kg/m^2] erot eri puolilla vaikuttavat liitoksen värähtelyeristävyyteen. Massiivisten rakenteiden arvot eivät ole sidoksissa taajuuteen. Liitoksen eristyskyky paranee, kun liittyvien rakenteiden pintamassojen välinen ero kasvaa. Nyrkkisääntönä voidaan käyttää, että ristiliitoksen värähtelyeristävyys on 9 dB ja T-liitoksen 6 dB. (RIL 243-1-2007 2007, 107.) Mikäli T-liitoksessa käytetään joustavaa materiaalia, sen värähtelyeristävyys on 10 dB korkeampi kuin jäykässä liitoksessa. Ristiliitoksessa ei kannata käyttää joustavaa materiaalia, koska silloin rakenteelle ei synny minkäänlaista värähtelyeristävyyttä. (RIL 243-1-2007 2007, 107.)

Kevyitä rakennusosia pitkin tapahtuvien sivutiesiirtymien arviointi on huomattavasti vaikeampaa kuin massiivisia rakennusosia pitkin tapahtuvien sivutiesiirtymien. Levyrakenteiden koinsidenssin rajataajuuden ollessa 100 – 3150 Hz välillä kevyissä rakenteissa tapahtuu pakkovärähtelyä. Pakkovärähtely ei etene liitosten yli yhtä helposti kuin massiivirakenteissa. Kevyt rakenne säteilee sivutiesiirtymä-ääntä liitoksen lähistöltä nurkasta ja sekin on vähäistä. Värähtelyeristävyyssarvot ovat yleensä suurempia kevytrakenteissa. (RIL 243-1-2007 2007, 109.) Vaikka kevyen rakenteen seinän liitos olisikin hyvin ääntäeristävä, pitää muistaa, että kevyen rakenteen ääneneristävyys on pienillä taajuuksilla huonompi kuin raskaamman rakenteen.

3.7 Yksinkertainen rakenne

Yksinkertaisen rakenteen rajataajuudet



Kuvio 6. Yksinkertaisen seinän rajataajuudet (Kylliäinen 2013, 8.)

Yksinkertaisella rakenteella tarkoitetaan rakennetta, joka on kauttaaltaan samaa materiaalia tai kun eri materiaalikerrokset ovat yhteydessä toisiinsa niin, että ne värähtelevät yhtenä kokonaisuutena. Ääniaallon kohdatessa kiinteään tiiviin seinämän ilmanpaine saa seinän liikkeeseen. Mitä raskaampi seinä, sitä vähemmän se heilahtelee. Ääneneristävyys perustuu siis lähinnä rakenteen ilmatiiviyteen ja massaan. (Lahtela 2004, 20.)

Yksinkertaisen rakenteen ääneneristävyys noudattelee massalakia, mutta on muistettava, että laki koskee ainoastaan raskaita rakennusosia, joissa ei esiinny resonanssi-ilmiötä yleisimmällä äänialueella. (Siikanen 1996, 125.)

3.8 Kaksinkertainen rakenne

Kaksinkertainen rakenne koostuu kahdesta erillään olevasta tiiviistä seinämästä, joissa levykerrosten väliin jää ilmapäli. Tällaista rakennetta kutsutaan massa-jousimassa –järjestelmäksi. Äänenpaine aiheuttaa toiseen seinäpuoliskoon heilahdusliikkeen, joka on sitä vähäisempi, mitä raskaampi seinäpuolisko on. Ilmapäliä kutsutaan myös ilmajouseksi, koska se vaimentaa äänenpaineen aiheuttamaa värähtelyä. Heilahdusliike välittyy toiseen seinäpuoliskoon ilmajousen kautta. Pehmeämpi ilmajousi tai suurempi ilmapäli pienentää välittymistä. Ilmajousta voidaan pehmentää lisäämällä kitkaa synnyttävää materiaalia seinämien väliin. Tämä parantaa ääneneristävyyttä korkeilla taajuuksilla. Matalilla taajuuksilla vaikutus on 1 - 2 dB. (Siikanen 1996, 129.) Vastaavasti, jos ilmapäliässä ei ole yhtään absorptiomateriaalia, kaksinkertaisen seinän ääneneristävyys heikkenee jopa 20 dB. Ilmapäliin syntyy tällöin seisovia aaltoja. Kaiuntaa tapahtuu pienillä ja keskisuurilla taajuuksilla levyn suuntaisesti pysty- ja vaakasuunnassa sekä kohtisuorassa levyä vastaan. Ilmapälin absorptiomateriaali estää kaiuntaa kaikissa kolmessa suunnassa. (RIL 243-1-2007 2007, 77.)

Siikasen (1996, 127.) mukaan kaksi- tai useampikerroksisilla rakenteilla saavutetaan kerrosten massasta riippumatta parempia ilmaääneneristävyyksiä kuin yksinkertaisilla rakenteilla.

Kaksinkertaiset seinärakenteet voidaan jaoitella kytkemättömiin ja kytkettyihin kaksinkertaisiin seiniin. (Kuvio 7.) Näistä kytkemättömällä päästään parhaimpiin ilmaääneneristyslukuihin. Kytkemättömälle kaksinkertaiselle levyseinälle ilmaääneneristävyys voidaan laskea kaavasta 20.

$$R = \begin{cases} 20 \log_{10}(m'_1 + m'_2)f - 48 \text{ dB}, & \text{kun } f < f_{mam} \\ R_1 + R_2 + 20 \log_{10}fd - 29, & \text{kun } f_{mam} < f < f_1 \\ R_1 + R_2 + 6, & \text{kun } f > f_1 \end{cases} \quad (20)$$

missä R_1 ja R_2 ovat pintalevyjen 1 ja 2 ääneneristävyydet

d on ilmapälin paksuus [m]

f on taajuus [Hz]

rajataajuus f_l [Hz] lasketaan kaavasta 21.

massa-ilma-massa –resonanssin ominaistajuuus f_{mam} lasketaan kaavasta 22.
(RIL 243-1-2007 2007, 76.)

$$f_l = \frac{c_0}{6d} \quad (21)$$

missä c_0 on äänen nopeus ilmassa (343m/s)

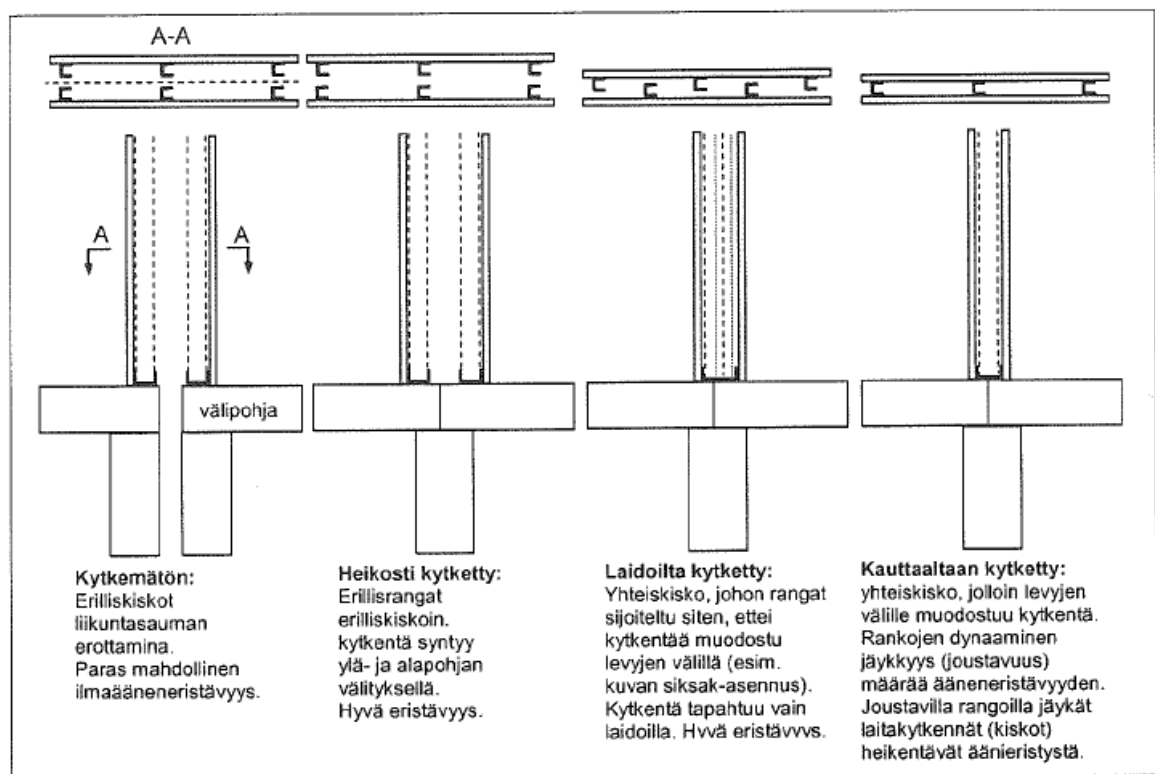
d on ilmapälin paksuus [m]

(RIL 243-1-2007 2007, 76.)

$$f_{mam} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1,8\rho_0 c_0^2 (m'_1 + m'_2)}{d(m'_1 + m'_2)}} = 80 \sqrt{\frac{(m'_1 + m'_2)}{d(m'_1 + m'_2)}} \quad (22)$$

missä ρ_0 on ilman tiheys (1,18kg/m³)

(RIL 243-1-2007 2007, 76.)



Kuvio 7. Kaksinkertaisen levyseinän kyttemät (RIL 243-1-2007 2007, 74.)

3.9 Rakenteiden saumojen ääneneristävyyden

Lahtelan (2004, 51.) mukaan tiiviys on yksi tärkeimmistä ilmapälinen eristävyyden vaikuttavista asioista. Raolla tai aukolla rakenteessa ei ole ääneneristävyyttä

lainkaan. Huokoisen materiaalin lisäämisellä aukkoon sen ilmaääneneristävyys paranee korkeilla taajuuksilla 10 – 20 dB. Taulukko 3:sta nähdään kuinka pieni rako vaikuttaa merkittävästi ilmaäänieristävyyteen heikentymiseen.

Ääniteknisessä suunnittelussa rakenteiden on tarkoitus olla tiiviitä, eikä ilmavirran pitäisi päästä kulkemaan liitosten kautta. Rakenteisiin voi kuitenkin jäädä rakoja työvirheiden, huonon saumauksen tai huonosti valettujen liitosten takia.

Rakenteiden yhteisääneneristävyyden kaavasta (Kaava 23) saadaan johdettua kaava rakenteen ääneneristävyydelle, jossa on yksi rako. (Kaava 24)

$$R_{yhteis} = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_i S_i}{\sum_i S_i 10^{-R_i/10}} \right] \quad (23)$$

missä S_i on rakenteen i pinta-ala [m^2]

R_i on rakenteen i mitattu tai ennustettu ääneneristävyys [dB]

(RIL 243-1-2007 2007, 102.)

$$R_{yhteis} = 10 \log_{10} \left[\frac{S_1 + S_2}{S_1 * 10^{-\frac{R_1}{10}} + S_2 * 10^{-\frac{R_2}{10}}} \right] \quad (24)$$

Missä S_1 on rakenteen kokonaispinta-ala [m^2]

R_1 on rakenteen ääneneristävyys [dB]

S_2 on raon kokonaispinta-ala [m^2]

R_2 on raon ääneneristävyys [dB]

(RIL 243-1-2007 2007, 86.)

Suurimman osan taajuusalueesta raon ääneneristävyys on suurempi kuin nolla, tyypillisesti 5 – 10 dB, mutta yksinkertaisimmissa laskuissa voidaan käyttää $R_2 = 0 \text{ dB}$. Raon ääneneristävyys resonanssitaajuudella on -5 – -10dB. (RIL 243-1-2007 2007, 87.) Kun ääneneristävyys on negatiivinen, ääntä ei synny lisää, vaan rako alkaa imemään itseensä ääntä suuremmalta alueelta kuin sen poikkipinta-ala on. Resonanssi vahvistaa ääntä ja säteily on voimakasta tämän vuoksi.

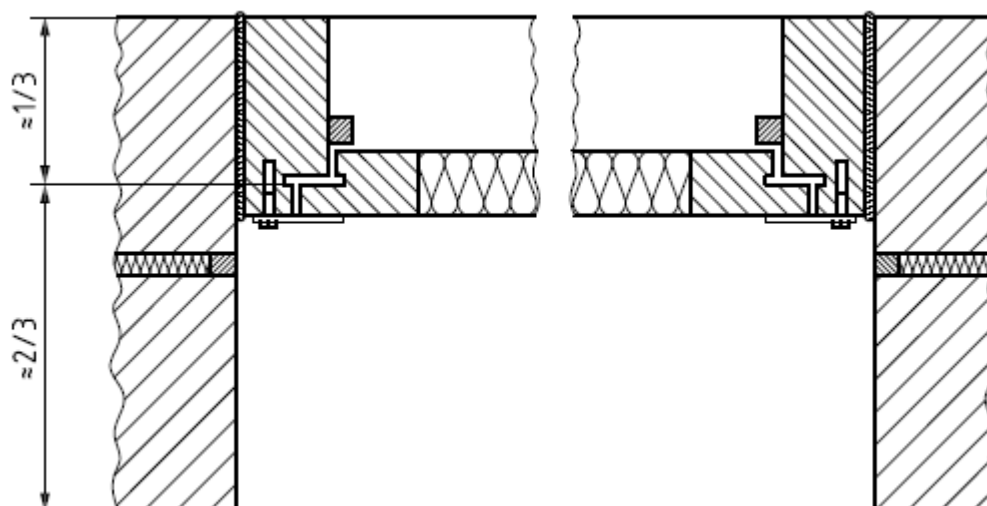
Taulukko 6. Raon vaikutus rakenteen ilmaääneneristävyyteen (Lahtela 2004, 20.)

Raon leveys [mm]	Seinän ilmaääneneristävyys, kun raon ilmaääneneristävyys on		
mm	0 dB	10 dB	20 dB
500	10,0	20,0	30,0
50	20,0	30,0	40,0
5	30,0	40,0	49,5
0,5	40,0	49,5	57,0
0,05	49,5	57,0	59,5
0,005	57,0	59,5	60,0
0,0005	59,5	60,0	60,0
0,00005	60,0	60,0	60,0

4 ÄÄNENERISTYKSEN TESTITILOJEN SUUNNITTELU

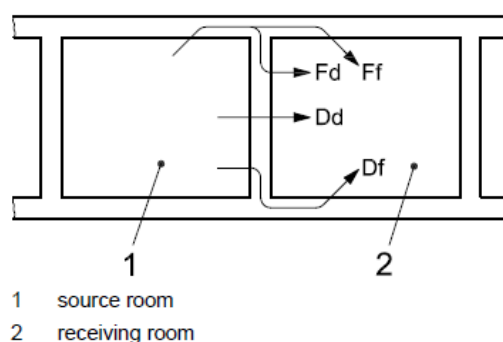
4.1 Lähtökohtia suunnittelulle

Standardi ISO 10140-5 antoi lähtökohdat suunnitteluun. Testaustilat suunniteltiin ”huone huoneessa” –menetelmällä eli testaustilojen rakenteet irrotettiin merikontin rungosta. Testaustilan tilavuus on yhteensä 17 m³, jolla ei päästä ISO 10140-5 mukaiseen 50 m³ testaustilaan. Tämä vaikuttaa testaustulokseen pienillä taajuuksilla. ISO 10140-5 (2010, 8.) mukaan lähetyshuoneen täytyy olla suurempi kuin vastaanottohuone. Testaustiloissa lähetyshuoneen koko koostui 2/3 testaustiloista.



Kuvio 8. Testaustilojen mittasuhteet (ISO 10140-5, 2010,5.)

Kuviosta 9 nähdään äänen kulkeutuminen testitiloissa. D_d on väliseinän läpäissyt ääni ja F_d , F_f sekä D_f ovat sivutiesiirtymien kautta kulkevaa ääntä.

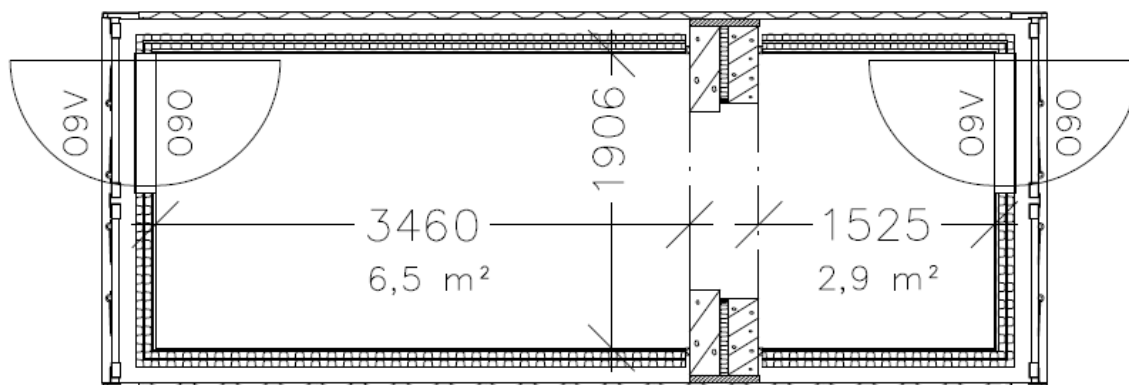


Kuvio 9. Äänen kulkeutuminen testitiloissa (ISO 10140-5, 2010,10.)

ISO 10140-5 (2010, 23.) mukaan seinien, katto- ja lattiapintojen kautta tapahtuville sivutiesiirtymille saadaan taulukon 7 mukaisia ääneneristävyksiä.

Taulukko 7. Tyypillisiä ääneneristävyksiä testaustiloissa (ISO 10140-5, 2010, 12.)

Taajuus Hz	Rmax reiteille F_f , F_d ja D_f dB
100	45,0
125	50,0
160	53,0
200	56,0
250	58,5
315	61,0
400	63,5
500	66,0
630	68,5
800	71,0
1000	73,5
1250	76,0
1600	78,5
2000	81,0
2500	83,5
3150	85,0
4000	88,5
5000	91,0



Kuvio 10. Testitilojen pohjakuva

4.2 Laboratoriomittaus

Laboratoriomittauksessa määritetään testattavan kappaleen ilmaääneneristävyyttä. Laboratorio koostuu kahdesta erillisestä huoneesta, jotka erottaa aukko, johon testikappale asennetaan. Mikäli näyte on pienempi kuin itse aukko, aukkoa kavennetaan täyteseinällä. Sivutiesiirtymien kautta kulkevan äänen täytyy olla vähäistä, jotta testauskohteelle pystytään mittaamaan ääneneristävyys luotettavasti. RIL 243-1-2007 (2007, 56.) mukaan laboratorioarvoja saavutetaan harvoin rakennuksessa, koska mittaushuoneet ovat massiivisia ja toisistaan runkoääneneristettyjä, eikä huoneiden välillä ole äänivuotoja. Rakennuksessa sivutiesiirtymien pitäisi siis olla alhaisia ja äänivuotoja ei saisi olla, jotta päästäisiin lähelle laboratorioarvoja.

Testattavalle koekappaleelle voidaan määrittää ilmaääneneristävyys mittausten perusteella kaavasta 22.

$$R = L_{p,1} - L_{p,2} + 10 \log_{10} \frac{S}{A_2} \quad (22)$$

missä $L_{p,1}$ on lähetyshuoneen äänenpainetaso [dB]

$L_{p,2}$ on vastaanottohuoneen äänenpainetaso [dB]

S on tiloja erottavan rakennusosan pinta-ala [m²]

A_2 on vastaanottohuoneen absorptioala [m² –Sab], joka voidaan laskea kaavasta 23.

ISO 10140-1 (2010, 2.)

$$A_2 = 0,16 \frac{V_2}{T_2} \quad (23)$$

missä V_2 on vastaanottohuoneen tilavuus [m^3]

T_2 on vastaanottohuoneen jälkikaiunta-aika [s]

(RIL 243-1-2007 2007, 59.)

Pienten elementtien, jotka ovat useimmiten korkeintaan $0,2 \text{ m}^2$, ääneneristykseen määrittämisessä käytetään normalisoitua yksikköääneneristävyttä $D_{n,e}$ (Kaava 24.)

Mikäli määrittämisessä käytettäisiin elementtien fysikaalista pinta-alaa, saadut ilmaääneneristävyyssarvot olisivat harhaanjohtavia. (RIL 243-1-2007 2007, 59.)

$$D_{n,e} = L_{p,1} - L_{p,2} + 10 \log_{10} \frac{A_0}{A_2} \quad (24)$$

missä $A_0 = 10 \text{ m}^2$

A_2 lasketaan kaavasta 20.

(RIL 243-1-2007 2007, 59.)

Kuviossa 11 on esitelty laboratoriomittauksessa käytettävä testauspöytäkirja. ISO 717-1 (2013.) mukaan ilmaääneneristävyys lasketaan siten, että testaustuloksia verrataan ISO 717-1:n vertailukäyrään. Vertailukäyrää siirretään 1 dB kerrallaan niin kauan, että eri taajuuksilla mitattujen ilmaääneneristyslukujen negatiivisten poikkeamien summa on $\leq 32 \text{ dB}$. (Kylliäinen 2013, 10.)

Sound reduction index of joints according to ISO 10140																																							
Determination of sound reduction index of joints																																							
Client:																																							
Description of the test specimen:																																							
Date of test:																																							
Test length t :																																							
Separation wall:																																							
Test noise:																																							
Volumes of the test rooms:																																							
Maximum joint sound reduction index:																																							
Mounting conditions:																																							
Climate in the test rooms:																																							
..... frequency range of weighting curve _____ test curve																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Frequency f Hz</th> <th style="text-align: center;">Sound reduction index R_s dB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100</td><td></td></tr> <tr><td>125</td><td></td></tr> <tr><td>160</td><td></td></tr> <tr><td>200</td><td></td></tr> <tr><td>250</td><td></td></tr> <tr><td>315</td><td></td></tr> <tr><td>400</td><td></td></tr> <tr><td>500</td><td></td></tr> <tr><td>630</td><td></td></tr> <tr><td>800</td><td></td></tr> <tr><td>1 000</td><td></td></tr> <tr><td>1 250</td><td></td></tr> <tr><td>1 600</td><td></td></tr> <tr><td>2 000</td><td></td></tr> <tr><td>2 500</td><td></td></tr> <tr><td>3 150</td><td></td></tr> <tr><td>4 000</td><td></td></tr> <tr><td>5 000</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Frequency f Hz	Sound reduction index R_s dB	100		125		160		200		250		315		400		500		630		800		1 000		1 250		1 600		2 000		2 500		3 150		4 000		5 000		<p>The graph plots the Sound Reduction Index (R_s) in dB against Frequency (f) in Hz. The test curve is shown as a solid line, starting at ~35 dB at 125 Hz, rising to ~51 dB at 400 Hz, and then leveling off at ~56 dB from 1000 Hz to 2000 Hz. A dashed horizontal line indicates the frequency range of the weighting curve.</p>
Frequency f Hz	Sound reduction index R_s dB																																						
100																																							
125																																							
160																																							
200																																							
250																																							
315																																							
400																																							
500																																							
630																																							
800																																							
1 000																																							
1 250																																							
1 600																																							
2 000																																							
2 500																																							
3 150																																							
4 000																																							
5 000																																							
Evaluation according to ISO 717-1 (In one-third octave bands): $R_{k,w}(C; C_{tr}) = \quad$ dB $C_{100-5\,000} = \quad$ dB; $C_{s, 100-5\,000} = \quad$ dB;																																							
Test report No:																																							
Date:	Signature:																																						

Kuvio 11. Testauspöytäkirja (ISO 10140-1 2010,10.)

RIL 243-1-2007 (2007, 59.) mukaan laboratoriohuoneiden rakenteiden tulee olla toteutettuna niin, että niiden kautta kantautuva äänitehotaso on 6 dB vähemmän kuin testattavan koekappaleen välittämä äänitehotaso. Laboratoriolle voidaan määrittää maksimiääneneristävyys, jota korkeampia ääneneristävyyden arvoja ei voida enää mitata luotettavasti. Jos testattavan kappaleen ääneneristävyys on suurempi kuin laboratorion maksimiääneneristävyys, tuloksena voidaan esittää vain alalikiarvo näytteen todellisesta arvosta. Testaustilojen maksimiääneneristävyyden arvoksi saatiin $R'_w = 70$ dB. Maksimiääneneristävyys mitattiin kenttämittauksena. Mittausta ei suoritettu laboratoriomittauksena koska seinät, lattiat ja katot ovat

kevytrakenteisia eikä laboratoriomittauksella voida arvioida tällaisia rakenteita luotettavasti.

ISO 10140-4 (2010, 10.) Huoneet, joiden tilavuus on pieni eivät ole käyttökelpoisia mitattaessa pienillä taajuuksilla. Vähintään yhden huonemitan täytyy olla yhden aallonpituuden pituinen ja toisen puoli aallonpituutta pienimmällä taajuudella. Lisäksi mikrofonin pitää olla aseteltuna standardien vaatimusten mukaisesti. Kaavasta 1 saadaan pienimmän oktaavikaistan aallonpituus

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343 \frac{m}{s}}{100 \text{ Hz}} = 3,43 \text{ m}$$

Laskusta huomataan, että aallonpituus ei mahdu vastaanottohuoneeseen. Kaavasta 1 johtamalla saadaan selvitettyä pienin taajuus, jolla voidaan mitata luotettavasti.

$$\lambda = \frac{v}{f} \rightarrow \lambda f = v \rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{343 \frac{m}{s}}{2,3 \text{ m}} = 149,1 \text{ Hz}$$

Pienissä huoneissa testaustuloksen lopputulos on erittäin riippuvainen äänilähteen sijainnista. Vaikka testaustulos olisikin tyydyttävä, testaustulosten toistaminen ja niiden vertaaminen toisiinsa voi olla hyvin hankalaa. Testaustulosten hajontaa voidaan vähentää kiinnittämällä erityistä huomiota siihen, että testausolosuhteet ovat testauksissa samanlaisia.

Mikrofoni tulisi sijoittaa neljäsosan aallonpituudesta seinistä, mutta ei kuitenkaan enempää kuin 1,2 m. Samaa mittaa voidaan käyttää myös testauskappaleen ja mikrofonin etäisyytenä. (ISO 10140-4 (2010, 10.) Näin ollen pienin taajuus, jolla voidaan mitata luotettavasti on:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{v}{f} = 0,7625 \text{ m} \rightarrow \frac{v}{f} = 4 * 0,7625 \text{ m} \rightarrow v = 4 * 0,7625 \text{ m} * f$$

$$\rightarrow f = \frac{343 \frac{m}{s}}{4 * 0,7625 \text{ m}} = 112,5 \text{ Hz}$$

Yhdistämällä nämä kaksi vaatimusta voidaan todeta pienimmän taajuuden, jolla voidaan luotettavasti mitata, olevan noin 150 Hz.

4.3 Seinärakenteet

Seinärakenteeksi valittiin kaksinkertainen teräsrankaseinä, rankojen välissä on 10 mm ilmaväli. Sisäpintaan asennettiin kaksinkertainen erikoiskova kipsilevy. RIL 243-1-2007 (2007, 75.) mukaan joustavilla teräsrangeilla päästään parempiin ilmaääneneristävyyssarvoihin kuin jäykällä puurangoilla. Parannus on kuitenkin korkeintaan 8 – 10 dB, koska pienet taajuudet vaikuttavat eniten R_w –arvoon. Teräsrankoja muotoilemalla ja rei'ittämällä ääneneristysominaisuudet paranevat. (RIL 243-1-2007 2007, 80.) RIL 243-1-2007 (2007, 78.) mukaan ääneneristävyys on sitä parempi, mitä joustavampaa rankaa käytetään. Etu joustavilla rangeilla saavutetaan toki vain seinän keskiosissa, koska kiskot ja laidoissa olevat pystyrangat ovat usein jäykästi kiinni rakenteissa. Tätä pyrittiin ehkäisemään kiinnittämällä rangat kattoon EP700 + Sylomer 30 –alakattoripustimella. Jäykällä rangeilla kytketyn seinän ääneneristävyys siltataajuuden f_{br} yläpuolella voidaan arvioida kaavasta 25.

$$R_{br} = R_m + \Delta R_m \quad (25)$$

missä R_m on seinän massalakiarvo, joka voidaan laskea kaavasta 11.

ΔR_m voidaan laskea kaavasta 26.

(RIL 243-1-2007 2007, 79.)

Siltataajuus f_{br} tarkoittaa taajuutta, jonka yläpuolella jäykkien rangejen ääneneristävyys heikkenee. Siltataajuuden alapuolella ääneneristävyys noudattelee kytkemättömän kaksinkertaisen seinärakenteen ääneneristävyyttä R_{real} . Siltataajuus voidaan laskea kaavasta 27.

$$R_m = 10 \log_{10}(b f_c) + 20 \log_{10} \frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} - 18 \quad (26)$$

missä f_c on levyn koincidenssin rajataajuus [Hz]

b on viivakytkentöjen eli rankojen välinen etäisyys [m]

$$f_{br} = f_{mam} \left(\frac{\pi b f_c}{2 c_0} \left(\frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (27)$$

missä f_{mam} on massa-ilma-massa –resonanssitaajuus, joka voidaan laskea kaavasta 22.

Koinsidenssitaajuus kipsilevylle saadaan laskettua kaavasta 13. Erikoiskovalle kipsilevylle 13 mm löytyvät seuraavat taulukkoarvot (RIL 243-1-2007 2007, 91.)

$$E = 4,5 \text{ Gpa} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

$$\mu = 0,25$$

$$c_0 = 343 \text{ m/s (20 °C)}$$

13 mm erikoiskovan kipsilevyn koinsidenssitaajuus:

$$\frac{(343 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1 - 0,25^2) 11,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{4,5 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot (0,013 \text{ m})^3}} = 2161 \text{ Hz}$$

Kaksinkertaisessa levyrakenteessa levyt on ruuvattava toisiinsa kiinni, liimamalla koinsidenssitaajuudeksi saadaan:

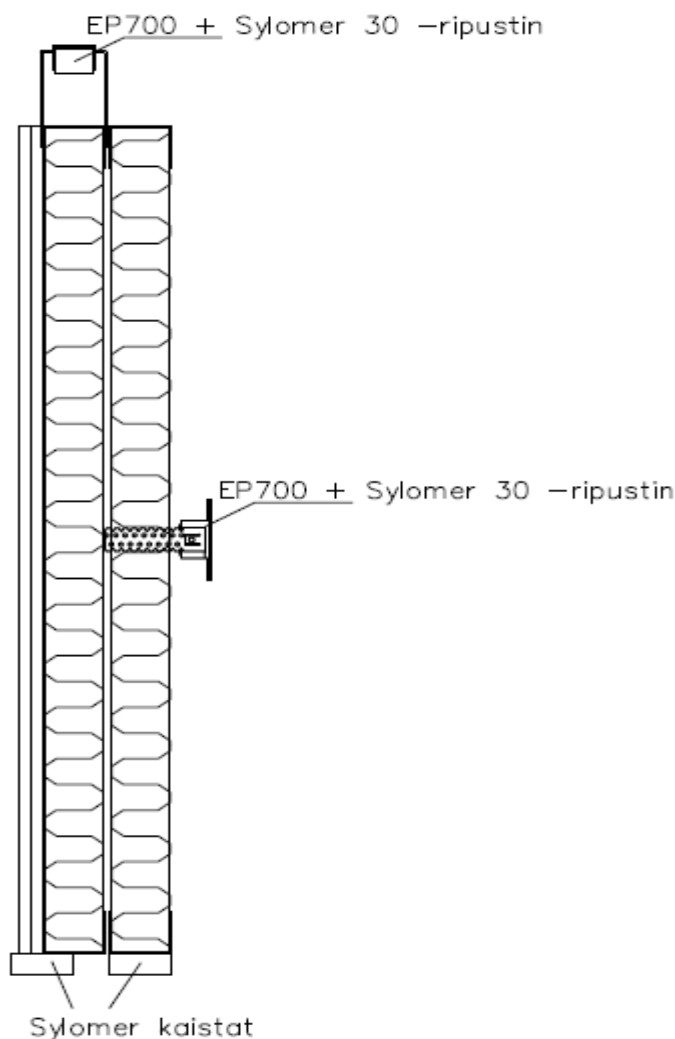
$$\frac{(343 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1 - 0,25^2) 23,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{4,5 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot (0,026 \text{ m})^3}} = 1080 \text{ Hz}$$

Kaavasta 12 voidaan laskea kipsilevylle ilmaääneneristävyyden arvo.

Koinsidenssitaajuudeksi saatiin 2161 Hz. Kipsilevyn häviökertoimena käytetään vakioarvoa $\eta = 0,02$.

$$R = \begin{cases} 20 \log_{10} (11,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} f) - 48 \text{ dB}, & \text{kun } f < 1080 \text{ Hz} \\ 20 \log_{10} (11,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} f) + 10 \log_{10} \left[0,02 \left(\frac{f}{2161 \text{ Hz}} - 1 \right) \right] - 44 \text{ dB}, & \text{kun } f \geq 2161 \text{ Hz} \end{cases}$$

Taajuusalueelle $\frac{1}{2} f_c - f_c$ ei voida laskennallisesti määrittää ilmaääneneristävyyttä, mutta se pystytään määrittämään yhdistämällä käyrät (RIL 243-1-2007 2007, 71.)



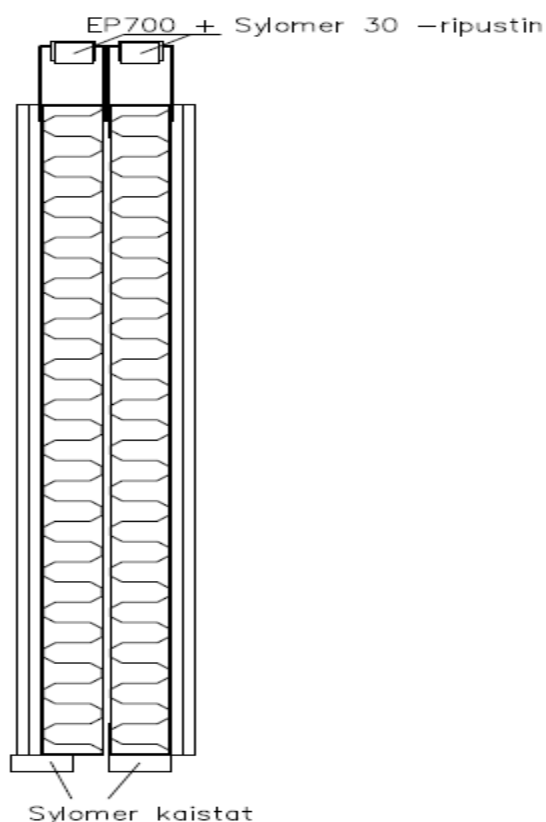
Kuvio 12. Sivuseinän rakenne

Kaksinkertaisessa teräsrankaseinässä rangat asennetaan sik-sak –menetelmällä, jolloin minimoidaan äänisiltojen muodostuminen. Ilmaväli rankojen välissä estää äänen siirtymisen ylä- ja alajuoksun kautta. Kipsilevyjen levysaumot asetettiin limittäin ensimmäiseen levykerrokseen nähden.

Rangat kiinnitettiin joustavasti kontin seiniin EP700 + Sylomer 30 –ripustimilla. Tällä pyrittiin estämään rungon vaakasiirtymää. Sisimmäinen teräsranka kiinnitettiin kattoon EP700 + Sylomer 30 –ripustimilla. Näin teräsranan joustavuus säilyy laidoillakin, kun se on kiinnitetty joustavasti.

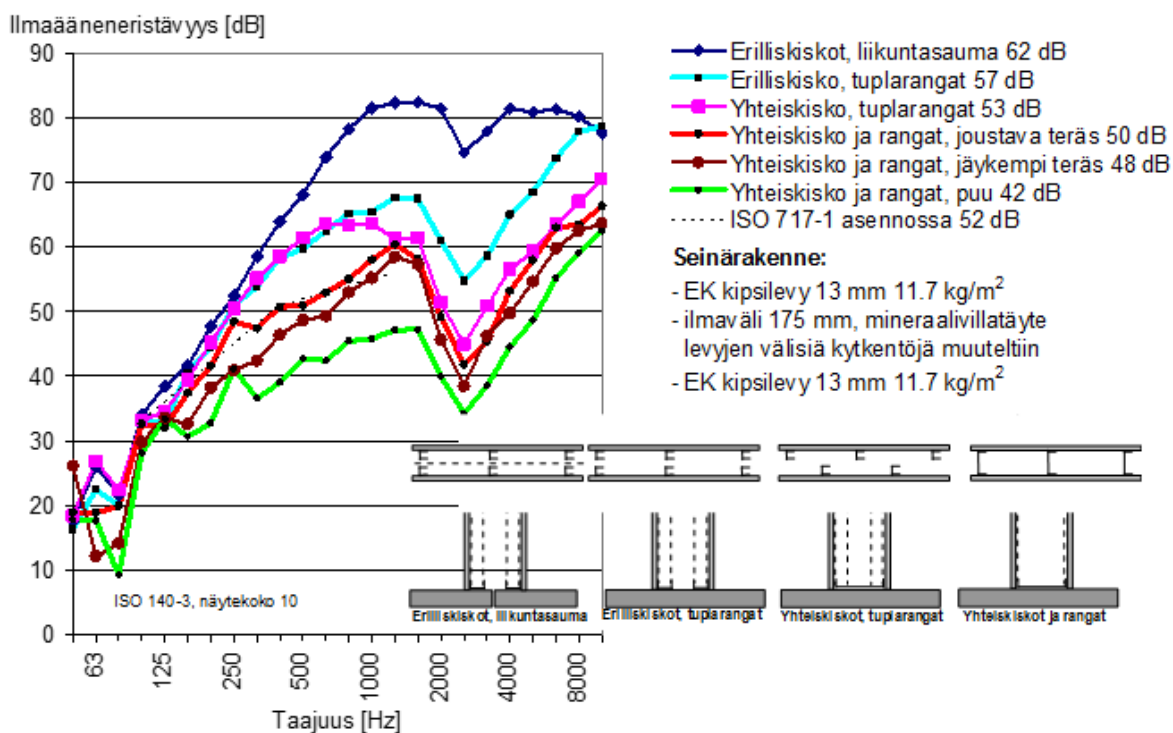
Ilmatilaan asennetaan pehmeää mineraalivillaa. Kaksinkertaisissa levyrakenteissa vaimennusmateriaalin vaikutus ääneneristävyyteen on 5 – 10 dB (Siikanen 1996, 117.)

Rungon alapäähän asennettiin 100 mm Sylomer –kaista, jonka tarkoitus on vaimentaa rungon aiheuttamaa tärinää. Kaista asennettiin lohkoina seinän pituussuunnassa. RT 38170 (2011.) mukaan Sylomer –tärinäeriste on solumaisesta polyuretaanista valmistettu elastinen matto, jota on saatavana kymmentä eri laatua: Sylomer SR11, SR18, SR28, SR42, SR55, SR110, SR220, SR450, SR850 ja SR1200. Osa materiaalin soluista on avoimia ja osa suljettuja riippuen materiaalin jäykkyydestä. Yleisellä tasolla Sylomerin toimivuus runkomelueristyksessä perustuu massa-jousijärjestelmään. Sopiva materiaali valitaan kuormituksen ja kuormituspinta-alan perusteella huomioiden kuitenkin staattiset- ja hyötykuormat. Oikein valittuna materiaali puristuu näillä maksimikuormituksella 10 % paksuudestaan. Kun Sylomer –kaista asennetaan alustaan on sen oltava tasoitettu. Tasaisuusvaatimus on $\pm 3\text{mm}$. Asennusalustan tulee olla puhdas vedestä, pölystä ja muista epäpuhtauksista. Sylomer liimataan alustaan kiinni. (Christian Berner 2012.) Rungossa rangat ovat erillisillä kiskoilla ja välissä 10 mm ilmaväli. KytKentä muodostuu vain Sylomer –kaistan kautta. Tällaiselle seinärakenteelle ilmaääneneristävyys on kuvion 14 mukaan 62 dB.



Kuvio 13. Päätyseinän rakenne

Tutkimus kytkentöjen vaikutuksista



Kuvio 14. Kytkentöjen vaikutus. (Hongisto 2015, 51.)

Päädyissä kaksinkertaiseen runkoon asennetaan molemmiin puolin kaksinkertainen kipsilevy. Päädyissä ääneneristävyyttä voidaan arvioida kaavalla 20. Rajataajuus f_l [Hz] lasketaan kaavasta 21.

$$f_l = \frac{343 \frac{m}{s}}{6(0,066m + 0,010m + 0,066m)} = 402,58 \text{ Hz}$$

massa-ilma-massa –resonanssin ominaistajuus f_{mam} lasketaan kaavasta 22.

$$f_{mam} = 80 \sqrt{\frac{(23,4 \frac{kg}{m^2} + 23,4 \frac{kg}{m^2})}{(0,142m(23,4 \frac{kg}{m^2} + 23,4 \frac{kg}{m^2}))}} = 212,30 \text{ Hz}$$

Kaksinkertaiselle levyrakenteelle voidaan laskea kaavasta 28 ääneneristävyys, kun tiedetään molempien levyjen ilmaääneneristysluku. Laskennassa täytyy huomioida, että kaava arvioi ääneneristävyyttä noin 3 dB yläkanttiin.

$$R_N = 20 \log_{10} \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) \quad (28)$$

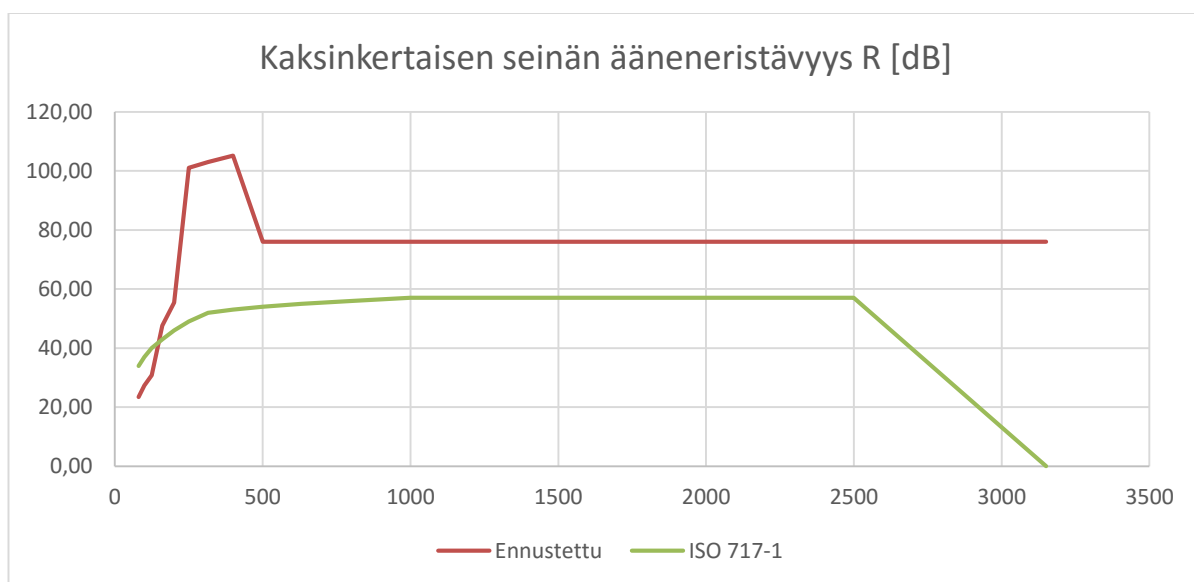
missä R_1 on levyn 1 ääneneristävyys [dB]

missä R_2 on levyn 2 ääneneristävyys [dB]

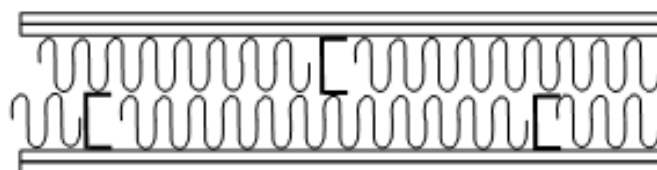
(Hongisto 2015, 43.)

13 mm erikoiskovan kipsilevyn ääneneristysluku on 29 dB (RIL 243-1-2007 2007, 91.)

$$R_N = 20 \log_{10} \left(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}} \right) = 20 \log_{10} \left(10^{\frac{29 \text{ dB}}{20}} + 10^{\frac{29 \text{ dB}}{20}} \right) = 35,02 \text{ dB}$$



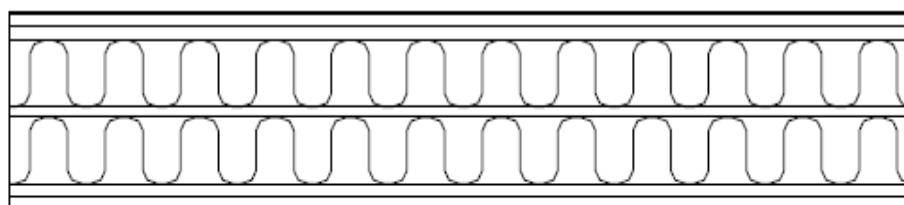
Kuvio 15. Kaksinkertaisen seinän ääneneristävyden kehittyminen



$R_w = 64 \text{ dB}$
 - 2 x kipsilevy 13 mm normaali 9 kg/m^2
 - ilmaväli 145 mm
 kaksinkertainen runko k 600
 villatäyte yli 80 % tilavuudesta
 - 2 x kipsilevy 13 mm normaali 9 kg/m^2

Kuvio 16. Kaksinkertaisen teräsrankaseinän ilmaääneneristävyys (Hongisto 2015, 32.)

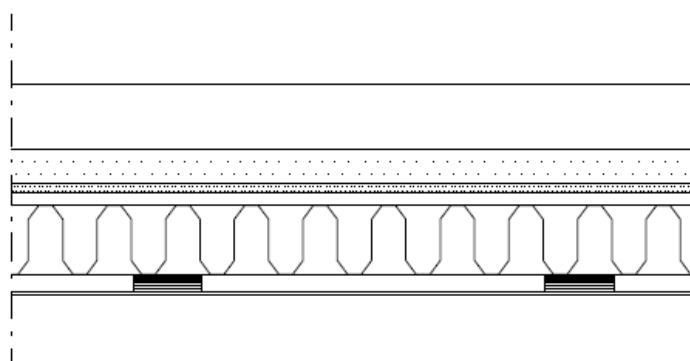
Liitteessä 2 on esitelty kaksinkertaisen seinän ääneneristävyyden laskenta. Kaksinkertaisen seinän ääneneristävyydeksi arvioitiin 55 dB. Käyttämällä teräsrankoja ilmaääneneristysluku on todellisuudessa isompi. Kuviossa 16 on esitelty lähes samanlainen seinärakenne kuin testaustilojen päädyssä oleva rakenne on. Ilmaväli on 3 mm suurempi kuvion 16 esimerkkirakenteessa ja levyrakenteena käytetään kevyempää normaalia kipsilevyä erikoiskovan kipsilevyn sijasta.



1. 2x Kipsilevy EK 13mm
2. Teräsrankat k600, välissä ilmarako 10mm
3. 2x Kipsilevy EK 13mm

Kuvio 17. Päätyseinän rakenne

4.4 Lattiarakenteet



1. Kipsivalu 50–80mm
2. Lattiakipsilevy 15mm
3. OSB–levy 18mm
4. 50x100 Runko k600 + Villa
5. Sylomer 25mm

Kuvio 18. Lattiarakenne

Lattiarakenteena käytettiin kelluvaa kipsivalulattiaa, jonka alle asennettiin lattiakipsilevy. Lattian tukirakenteena käytettiin OSB –levyä. Lattiavasoina

käytettiin 50x100 puuta. Vasat kelluivat Sylomer –kaistojen päällä. Lattiavasojen väliin asennettiin 100 mm mineraalivillaa.

Kelluva lattia koostuu RIL 243-1-2007 (2007, 75.) mukaan pehmeästä eristekerroksesta ja sen päälle tehtävästä rakenteesta. Eristekerroksena voidaan käyttää muun muassa mineraalivillaa, elastisoitua polystyreeniä tai tärinäeristimiä. Kelluvan lattian ääneneristävyyden kannalta lattian tärkein ominaisuus on ominaistajuus f_0 [Hz]. Ominaistaajuuteen vaikuttaa kelluvan rakenteen pintamassa m' [kg/m²] ja eristekerroksen dynaaminen jäykkyys s' [MN/m³]. Ominaistaajuus voidaan laskea kaavasta 26.

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (26)$$

missä s' on eristekerroksen dynaaminen jäykkyys [MN/m³]

m' on rakenteen pintamassa [kg/m²]

(RIL 243-1-2007 2007, 123.)

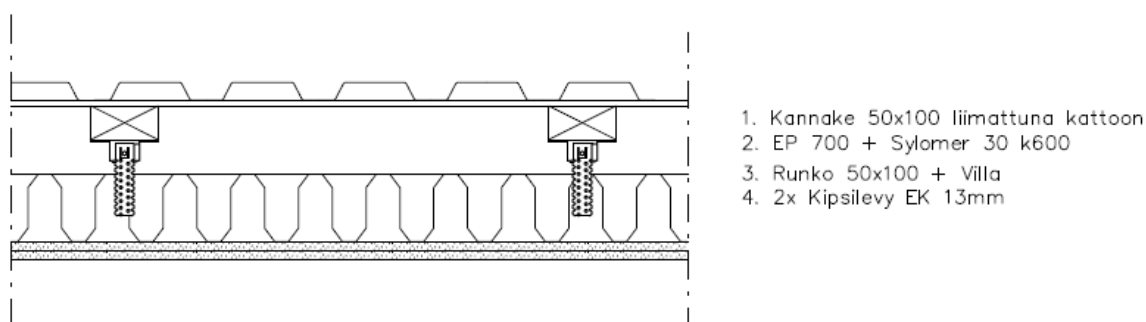
50 mm paksun kipsivalun pintamassa on $110 \frac{kg}{m^2}$, 15 mm lattiakipsilevyn pintamassa on $16,8 \frac{kg}{m^2}$ ja 18 mm OSB –levyn pintamassa saadaan kertomalla tiheys $630 \frac{kg}{m^3}$ paksuudella 0,018 mm, jolloin pintamassaksi saadaan $11,3 \frac{kg}{m^2}$. Lattiarakenteen yhteenlaskettu pintamassa on siis $138,1 \frac{kg}{m^2}$. Lattiassa käytettiin Sylomer laatua SR 28:a, jolle dynaaminen jäykkyys on $0,01748 \frac{N}{mm^3}$ eli $17,48 \frac{MN}{m^3}$

Testaustilojen lattian ominaistaajuus on

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} = 160 \sqrt{\frac{17,48 \frac{MN}{m^3}}{138,1 \frac{kg}{m^2}}} = 56,9 \text{ Hz}$$

4.5 Kattorakenteet

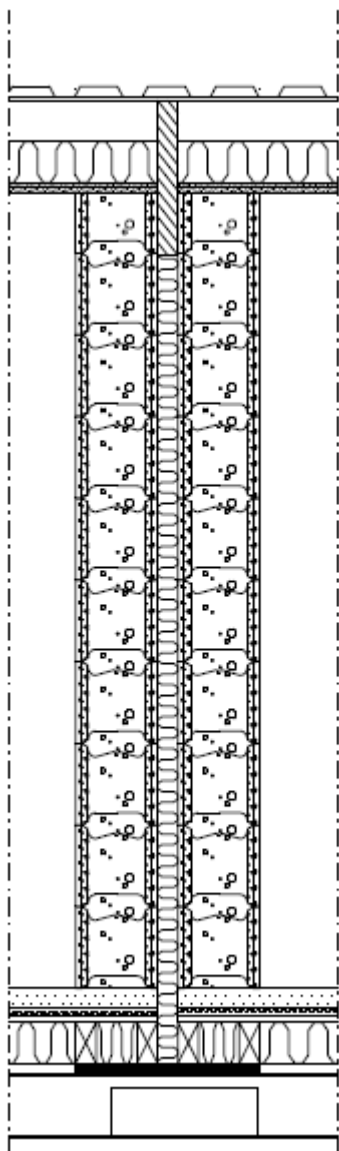
Kattorakenteeksi valittiin kaksinkertainen erikoiskova kipsilevy. Kipsilevyn päällä on kattovasat 22x100. Kattovasojen väliin asennettiin 100 mm mineraalivillaa. Runkorakenteet kannateltiin katosta alakattoripustimella EP700 + Sylomer 30. Merikontin kattoon liimattiin lauta, johon ripustin pystyttiin ruuvaamaan kiinni. Ripustin toimii äänen katkaisijana, jotta ääni ei pääsisi kulkeutumaan merikontin runkoon, koska siellä se voisi alkaa resonoida. Ripustimet mitoitettiin k800 –jaolle kontin pituussuunnassa ja k600 –jaolle kontin poikittaissuunnassa



Kuvio 19. Kattorakenne

4.6 Testausväliseinä

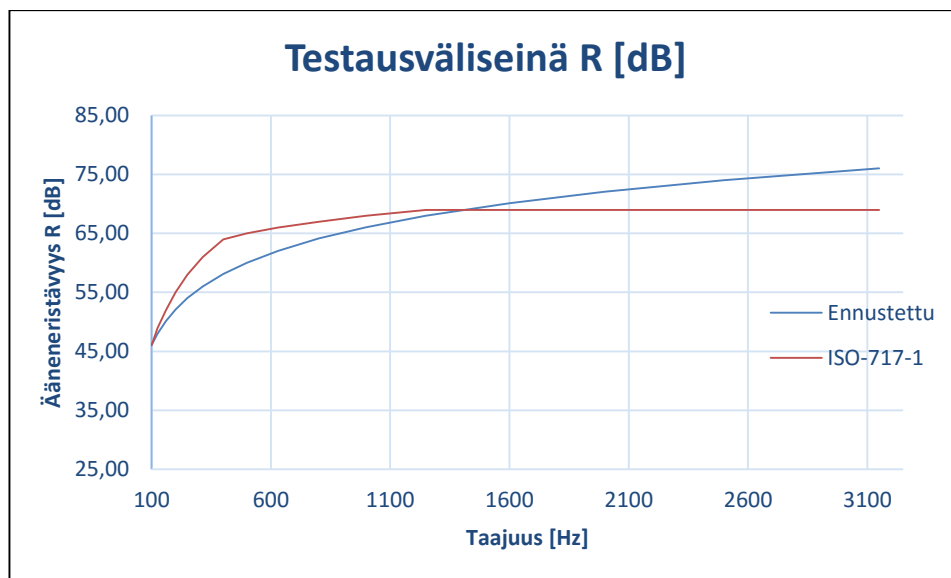
Testausväliseinä rakennettiin kahdesta seinämästä. Materiaalin täytyi olla betonia tai vastaava materiaalia, jonka tiheys on vähintään 1800kg/m^3 . (ISO 10140-5.) Testausväliseinän kohdalla katto- ja lattiarakenteet katkaistiin, jolloin väliseinästä saatiin kytkemätön rakenne. Väliseinämaterialina käytettiin muottiharkkoa, joka täytettiin betonilla. Näin seinämälle saatiin tiheydeksi 2250 kg/m^3 , joka täyttää standardin vaatimuksen. Muottiharkot valettiin valmiiksi betonilla ennen asennusta. Muurauksessa käytettiin savilaastia, jotta harkkoja voitaisiin käyttää uudelleen testauksissa. Ilmaväliin asennettiin 50 mm Sylomer –kaista. Kaista limitettiin viimeisen varvin väliin ja se jatkui kattoon saakka. Myös sivuille asennettiin Sylomer –kaista, jotta ääni ei kulkeutuisi sivukautta.



Kuvio 20. Testausväliseinän leikkauskuva

Asennettaessa ikkunaa testausaukkoon yksiaukkoisen ikkunan suositeltu koko on 1,23 m x 1,48 m ääniteknisiä ominaisuuksia tutkittaessa. (SFS 7031, 2013.)

RIL 243-1-2007 (2007, 86.) mukaan kiviaineksille sandwich-rakenteille voidaan arvioida ilmaääneneristävyyttä massalain avulla. (Kaava 11). Liitteessä 1 on arvio testausväliseinän ääneneristävyydestä. Testausväliseinälle arvioitiin ilmaääneneristyslukuksi 78 dB.



Kuvio 21. Testausväliseinän ääneneristävyyden kehittyminen

4.7 Rakenteiden liittymät

Levyjen liitoskohdat saumattiin akryylilateksimassalla, jotta levyjen välille saataisiin elastinen liitos. Väliseinän ja levyjen liitoksen tiivistyksessä käytettiin myös akryylilateksimassaa. Kuten aiemmin on todettu, tiiviys on ääneneristuksen perusehtoja, joten tiivistys toteutettiin huolellisesti, että rakoja ei syntyisi.

4.8 Testaustilojen käyntiovet

Seinärungon molempiin päätyihin asennettiin käyntiovet. Ovet ovat testaustilojen heikoiten ääntäeristävä rakenne, joten ne vaikuttavat heikentävästi testaustilojen kokonaisääneneristävyyteen. Testaustiloihin valittiin kaksinkertaiset ovet, koska yksinkertaisissa ovissa pienetkin vuodot laskevat ääneneristävyyttä huomattavasti. RIL 243-1-2007 (2007, 94.) mukaan on erityisen tärkeää, että oven kynnyks ja ovitiivisteet asennetaan huolellisesti. Tiivisteiden puuttuessa ilmaääneneristysluku ei ylitä 25 dB. Jos kynnyks puuttuu, yli 22 dB:n ilmaääneneristävyys saavutetaan harvoin.

Kummallekin ovilehdelle oli oma karmi, eivätkä ne olleet kytkettyinä toisiinsa. Lisäksi ilmaväliin sijoitettiin mineraalivillaa. Näin päästään mahdollisesti jopa $R'_w > 55$ dB arvoihin, kun ilmavälin paksuutta ei haluta kasvattaa kovin suureksi. (RIL 243-1-2007, 2007, 95.)

Karmien välit tilkittiin huolellisesti mineraalivillalla. Oven ympärys levytettiin umpeen erikoiskovilla kipsilevyillä ja tiivistettiin akryylilateksimassalla.

5 POHDINTA

Testaustilojen suunnittelu ja rakentaminen oli hyvin haastavaa, koska ratkaisut olivat monesti normaalista poikkeavia. Suhteutettuna budjettiin testaustilojen suunnittelu ja rakentaminen sujuivat hyvin. Ääneneristystestitiloista saatiin kustannustehokas ratkaisu ääneneristävyysmittauksia varten. Toteutuneet kustannukset olivat noin 7000 €. Testaustilojen toimivuutta olisi voinut parantaa, mutta se olisi vaatinut paljon suuremman budjetin. Parannusta oltaisiin saatu mikäli tilat olisi rakennettu suurempiin tiloihin tai esimerkiksi käyttämällä kalliimpia levyjä, joiden koinssidenssitaajuus ei olisi ollut taajuusalueella 10 – 3150 Hz. Suuremmissa testaustiloissa myös testausaukon toimivuus olisi parantunut, kun testausaukkoa oltaisiin saatu muokattua helpommin.

Kattavia laboratoriomittauksia varten testaustilojen rakenteiden tulisi olla massiivisia kivirakenteita ja sitä kautta sivutiesiirtymien minimaalisia sekä testikammioiden tilavuuksien tulisi olla huomattavasti suurempia. Lisäksi ympäristöolosuhteiden tulisi olla vakioituja sisäolosuhteita.

Testauksissa tulee ottaa huomioon mahdolliset virheet, jotka vaikuttavat testaustuloksiin. Näitä ovat muunmuassa lämpötila, ilman kosteus, mikrofonin sijainti ja testattavan koekappaleen vääränlainen asennus testausaukkoon. Virheitä ja niiden yhteisvaikutusta testaustuloksiin ei käsitelty tässä opinnäytetyössä.

Hyvin ääntäneristävien rakenteiden toteuttaminen onnistuu helposti hyvällä suunnittelulla ja oikeilla materiaaleilla, mutta erikoisratkaisut maksavat paljon. Etenkin hyvään tiivistämiseen tulee kiinnittää huomiota rakenteiden liitoskohdissa.

LÄHTEET

- Christian Berner. Sylomer asennusohje. 2012. [Verkkosivu]. Vantaa: Christian Berner Oy. [Viitattu 29.3.2016]. Saatavana:
[http://www.christianberner.fi/\\$-1/file/sylomer-asennusohje-fin.pdf](http://www.christianberner.fi/$-1/file/sylomer-asennusohje-fin.pdf)
- Hongisto, V. 2015. Meluntorjunta L ELEC-5640 kurssin aineisto. Helsinki: Aalto Yliopisto
- Kylliäinen, M. 2013. Puurakennusten ääneneristys ja akustiikka. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto
- Lahtela, T. 2004. Ääneneristys puutalossa. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Wood Focus Oy. [Viitattu 10.3.2016]. Saatavana:
<http://www.puuinfo.fi/rakentaminen/suunnitteluohjeet/aaneneristys-puutalossa>
- RIL 243-1-2007. 2007. Rakennusten akustinen suunnittelu. Akustiikan perusteet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
- RT 38170. 2011. Sylomer- ja Sylodyn-tärinäeristeet Christian Berner Oy. Rakennustieto
- Siikanen, U. 1996. Rakennusfysiikka perusteet ja sovellukset. Helsinki: Rakennustieto Oy
- Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. 2003. Ääneneristävyys rakennuksessa. Tampere: Rakennustieto Oy

OPINNÄYTETYÖHÖN LIITTYVIÄ STANDARDEJA

ISO 10140 –sarja:

SFS-EN ISO 10140-1:en

Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 1: Application rules for specific products (ISO 10140-1:2010)

SFS-EN ISO 10140-2:en

Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 2: Measurement of airborne sound insulation (ISO 10140-2:2010)

SFS-EN ISO 10140-3:en

Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 3: Measurement of impact sound insulation (ISO 10140-3:2010)

SFS-EN ISO 10140-4:en

Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 4: Measurement procedures and requirements (ISO 10140-4:2010)

SFS-EN ISO 10140-5:en

Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 5: Requirements for test facilities and equipment (ISO 10140-5:2010)

SFS-EN ISO 717-1:en

Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation (ISO 717-1:2013)

SFS 7031

IKKUNOIHIN SEKÄ SISÄÄNKÄYNTIOVIIN KOHDISTUVAT KANSALLISET VAATIMUKSET JA SUORITUSTASOJEN ARVIOINTI Characteristics and requirement levels of windows and external pedestrian doorsets in different applications (2013)

Liite 1: Massiivisen kivrakenteisen väliseinän ääneneristävyyslaskelmat

Testausväliseinän ääneneristävyys teoreettinen arviointi

m [kg/m ²]	f [Hz]	$R_0 = 20\lg m' + 20\lg f - 47$	ISO 717-1 (+13)	Ero:	Kumuloituva ero
450	100	46,06	46	-	0,00
450	125	48,00	49	1,00	1,00
450	160	50,15	52	1,85	2,85
450	200	52,08	55	2,92	5,77
450	250	54,02	58	3,98	9,74
450	315	56,03	61	4,97	14,71
450	400	58,11	64	5,89	20,61
450	500	60,04	65	4,96	25,56
450	630	62,05	66	3,95	29,51
450	800	64,13	67	2,87	32,39
450	1000	66,06	68	1,94	34,32
450	1250	68,00	69	1,00	35,32
450	1600	70,15	69	-	0,00
450	2000	72,08	69	-	0,00
450	2500	74,02	69	-	0,00
450	3150	76,03	69	-	0,00
450	4000	78,11	Summa:	35,32	
450	5000	80,04			

Ääneneristävyys R [dB] = 65 + 13 = 78 dB

Todellisessa rakenteessa sivutiesiirtymät pienentävät tätä eristävyyslukemaa.

Liitteessä 3 on esitelty testaustilojen ääneneristävyysmittausraportti.

Liite 2: Kaksinkertaisen levyseinän ääneneristävyyslaskelmat

Kaksinkertaisen seinän ääneneristävyys teoreettinen arviointi

Ilmavälin paksuus d [m]	0,142	
m_1 [kg/m ²]	23,4	
m_2 [kg/m ²]	23,4	
Yhden kipsilevyn ääneneristävyys R [dB]	29	
R_1 [dB]	35,02	
R_2 [dB]	35,02	
c_0 [m/s]	343	
f_l	402,58	$\frac{c_0}{6d}$
f_{mam}	212,30	$80 \sqrt{\frac{(m'_1 + m'_2)}{d(m'_1 + m'_2)}}$
Jos $f < f_{mam}$	$20 \log_{10}((m'_1 + m'_2)f) - 48 \text{ dB}$	
Jos $f_{mam} < f < f_l$	$R_1 + R_2 + 20 \log_{10} fd - 29 \text{ dB}$	
Jos $f > f_l$	$R_1 + R_2 + 6 \text{ dB}$	

	Taajuus	R [dB]	ISO 717-1 (+1)	Ero:	Kumuloituva ero
$f < f_{\text{mam}}$	80	23,47	34	10,53	10,53
$f < f_{\text{mam}}$	100	27,33	37	9,67	20,20
$f < f_{\text{mam}}$	125	30,85	40	9,15	29,36
$f < f_{\text{mam}}$	160	47,63	43	-	0,00
$f < f_{\text{mam}}$	200	55,47	46	-	0,00
$f_{\text{mam}} < f < f_l$	250	101,05	49	-	0,00
$f_{\text{mam}} < f < f_l$	315	103,05	52	-	0,00
$f_{\text{mam}} < f < f_l$	400	105,13	53	-	0,00
$f > f_l$	500	76,04	54	-	0,00
$f > f_l$	630	76,04	55	-	0,00
$f > f_l$	800	76,04	56	-	0,00
$f > f_l$	1000	76,04	57	-	0,00
$f > f_l$	1250	76,04	57	-	0,00
$f > f_l$	1600	76,04	57	-	0,00
$f > f_l$	2000	76,04	57	-	0,00
$f > f_l$	2500	76,04	57	-	0,00
$f > f_l$	3150	76,04	Summa: 29,36		
$f > f_l$	4000	76,04			
$f > f_l$	5000	76,04			

Ääneneristävyys $R \text{ [dB]} = 54 + 1 = 55 \text{ dB}$

Liite 3: Testaustilojen ääneneristävyydsmittaukset

KENTTÄMITTAUSRAPORTTI

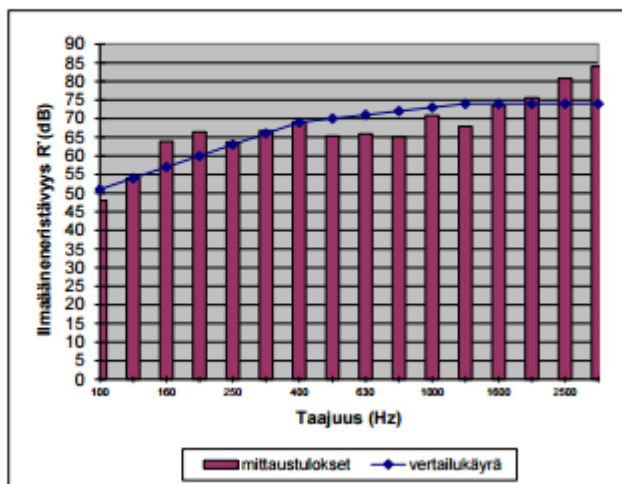
Ilmaääneneristävyyden määrittäminen 1/3-oktaavikaistoittain

Tehtävä: Huoneistojen välisen ilmaääneneristävyyden määrittäminen
Menetelmät: ISO 140-4: 1998 (mittaus) ja ISO 717-1 (R':n määrittäminen)
Mittauskohde: Juhonkatu 5, Seinäjoki
Mittauspvm: 18.5.2016
Mittajat: Jorma Tuomisto, Petri Lindfors, Jussi Hoplavuori
Lähetyshuone: Kammio 3,5 m x 1,8 m x 1,93 m
Vastaanottohuone: Kammio 1,35 m x 1,8 m x 1,93 m
Kuvaus rakenteista: Testausväliseinä:
 Betonihiharkko 200 mm eriste 50 mm betonihiharkko 200 mm

Lähetyshuoneen tilavuus: 12,1 m³
Vastaanottohuoneen tilavuus: 4,7 m³
Tiloja erottavan rakenteen pinta-ala S: 3,5 m²
Laitteisto: 01dB-Stell, Harmonie 4210

Ilmaääneneristävyys R' :	70 dB	Korjaus, dB: 18
Ei-toivottujen poikkeamien summa:	28,5 dB	(< 32 dB)

Taajuus f (Hz)	Mittausulos R' (dB)
100	48
125	54
160	63,9
200	66,4
250	63,7
315	66,7
400	69,1
500	65,3
630	65,9
800	65,1
1000	70,8
1250	67,9
1600	73,5
2000	75,6
2500	80,8
3150	84



Liite 4: Kuvia testaustilojen rakennusvaiheista